



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# 와유동형 스크러버의 내부유동 최적화에 관한 연구

A Study on the Internal Flow Optimization of a Swirl  
Type Scrubber



지도교수 박 권 하

2018 년 2 월

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

박 진 우

본 논문을 박진우의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 이 영 호 (인)

위 원 : 정 형 호 (인)

위 원 : 박 권 하 (인)



2017 년 12 월 18일

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	vii
1. 서 론	
1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구 목적 및 내용 .....	3
2. 스크러버 내부 유동에 관한 CFD 해석	
2.1 수학적 모델 및 계산 조건 .....	4
2.1.1 수학적 모델 .....	4
2.1.2 계산 조건 .....	6
2.2 전산 해석 결과 및 고찰 .....	10
2.2.1 압력 분포 특성 .....	10
2.2.2 배기가스 유동 특성 .....	14
2.2.3 속도 분포 특성 .....	18
2.2.4 세정수 분포특성 .....	23
2.3 요약 .....	27
3. 스크러버 내부 유동에 관한 실험	
3.1 실험장치 및 실험조건 .....	28
3.1.1 실험장치 구성 .....	28
3.1.2 실험조건 및 방법 .....	33
3.2 실험 결과 및 고찰 .....	37

3.2.1 연료 소모 시간 .....	37
3.2.2 배기 온도 .....	43
3.2.3 Back pressure .....	60
3.2.4 NOx .....	77
3.3 요약 .....	82
4. CFD 해석과 실험결과 비교 .....	83
4.1.1 Back pressure .....	83
4.1.2 배기가스 저감 .....	84
5. 결론 .....	86
참고문헌 .....	88



## List of Tables

Table 1	Input data for scrubber simulation .....	9
Table 2	Specifications of test engine .....	32



## List of Figures

Fig. 2.1 Scrubber modeling .....	7
Fig. 2.2 Scrubber inlet holes .....	7
Fig. 2.3 Guide vane at 60° .....	8
Fig. 2.4 Scrubber grids .....	8
Fig. 2.5 External and Internal area in scrubber .....	9
Fig. 2.6 Pressure distribution of horizontal section .....	11
Fig. 2.7 Pressure distribution of vertical section .....	12
Fig. 2.8 Pressure variation of guide vane angle .....	13
Fig. 2.9 Streamlines of exhaust gas .....	15
Fig. 2.10 Exhaust gas streamlines in internal area .....	16
Fig. 2.11 Moving distance of internal area .....	17
Fig. 2.12 Vector distribution of horizontal section .....	19
Fig. 2.13 Vector distribution of vertical section .....	20
Fig. 2.14 Gas flow vector distribution in the horizontal section .....	22
Fig. 2.15 Cleaning water distribution and flow velocity under the guide vane .....	26
Fig. 3.1 Schematic of experiment system .....	29
Fig. 3.2 Diesel engine and exhaust gas line .....	29
Fig. 3.3 Data measuring point of experimental system (from up to down, P1, P2, P3) .....	30
Fig. 3.4 Experimental scrubber .....	31
Fig. 3.5 Basic condition of engine for data acquisition .....	34
Fig. 3.6 Packing .....	34
Fig. 3.7 Pressure sensor .....	35
Fig. 3.8 Exhaust gas tester .....	35

Fig. 3.9 Temperature tester .....	36
Fig. 3.10 Smoke tester .....	36
Fig. 3.11 Fuel consumption time at packing 0% .....	40
Fig. 3.12 Fuel consumption time at packing 100% .....	42
Fig. 3.13 Exhaust gas temperature at no packing 0° .....	45
Fig. 3.14 Exhaust gas temperature at no packing 30° .....	47
Fig. 3.15 Exhaust gas temperature at no packing 45° .....	49
Fig. 3.16 Exhaust gas temperature at no packing 60° .....	51
Fig. 3.17 Exhaust gas temperature at no packing 75° .....	53
Fig. 3.18 Exhaust gas temperature at packing rate 100% 0° .....	55
Fig. 3.19 Exhaust gas temperature at packing rate 100% 45 .....	57
Fig. 3.20 Exhaust gas temperature at packing rate 100% 75° .....	59
Fig. 3.21 Back pressure at no packing 0° .....	62
Fig. 3.22 Back pressure at no packing 30° .....	64
Fig. 3.23 Back pressure at no packing 45° .....	66
Fig. 3.24 Back pressure at no packing 60° .....	68
Fig. 3.25 Back pressure at no packing 75° .....	70
Fig. 3.26 Back pressure at packing rate 100% 0° .....	72
Fig. 3.27 Back pressure at packing rate 100% 45° .....	74
Fig. 3.28 Back pressure at packing rate 100% 75° .....	76
Fig. 3.29 NOx reduction at packing Rate 0% .....	79
Fig. 3.30 NOx reduction at packing Rate 100% .....	81
Fig. 4.1 Back pressure comparison .....	83
Fig. 4.2 Exhaust gas reduction comparison .....	85



# A Study on the Internal Flow Optimization of a Swirl Type Scrubber

Jin Woo Park

Department of Mechanical Engineering  
Graduate School of  
Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub>, which are major pollutants of ships, are continuously regulated because they cause soil and water pollution. A scrubber is a typical SO<sub>x</sub> reduction device and being studied many ways. In this study, the guide vane was installed in the scrubber to improve the scrubber efficiency, and the influence of the swirl flow generated by guide angle on the exhaust gas reduction was analyzed through a computerized analysis. The pressure distribution, velocity distribution, exhaust gas flow, and cleaning water distribution tendency were analyzed when the guide angle was increased from 0° to 75°. The exhaust pressure increased greatly after 60°. The exhaust gas movement distance was maximum at 45° and the cleaning water distribution was also distributed most widely at 45°. As the result of the analysis, it was confirmed that the guide angle 45° was most suitable in terms of swirl flow, gas movement distance contacting with cleaning water, cleaning water distribution and exhaust pressure drop. Based on the results of the analysis, a scrubber for a 3300cc commercial diesel engine was installed and tested.

The experiment is conducted under the following conditions. Experimental conditions are guide angles of 0°, 30°, 45°, 60°, 75° and packing rates of 0%, 100% and engine speeds of 700RPM, 1000RPM, 1300RPM, 1600RPM and engine loads of Idle 25%, 50%, 75%, 100%. Fuel consumption time, exhaust temperature, back pressure, NO<sub>x</sub> reduction rate and smoke reduction rate are measured and

compared with the computational analysis results. The results show that the optimized angle of the scrubber guide vane is about  $45^{\circ}$ .

**KEY WORDS:** NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Scrubber, Guide vane, Swirl flow, Exhaust gas, Diesel engine



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

선박용 엔진과 같은 대형 디젤기관의 주요 배출 오염원인 질소산화물( $\text{NO}_x$ )과 황산화물( $\text{SO}_x$ )은 토양 및 수질오염의 원인이 되는 산성비, 인체에 유해한 광화학 스모그의 원인이 된다.<sup>1)2)</sup> 이러한 이유로 질소산화물과 황산화물 저감에 대한 관심이 꾸준히 커지고 있으며, 이에 따른 배출규제가 점차 강화 되고 있다.

우선 기존의 질소산화물 배출규제의 경우, 기존 엔진의 운전조건을 최적화하는 방법으로 규제를 만족시켰다(Tier I, Tier II). 하지만 2016년 1월 1일부로 적용된 Tier III의 경우 엔진의 운전조건을 최적화시키는 방법으로는 만족 할 수 없을 만큼 강화된 규제가 시행되고 있어서, 규제 만족을 위한 다양한 기술이 연구되고 있다.<sup>3)</sup>

황산화물 배출규제의 경우 연료의 황 함량을 제한하는 방법이 우선적으로 시행되었다. 전 세계적 황 제한치는 2012년까지 4.5%이었으며, 2012년부터 3.5%으로 제한되었다. 2020년부터는 황 제한치를 0.5%으로 제한한다는 내용이 발표 되었다. 배출가스 제한구역(ECAs)에서는 2010년 3월1일까지 황 제한치가 1.5%이었으며, 2010년 3월 1일 부터 2015년까지 황 제한치가 1%로 감소되었고, 2015년부터는 0.1%으로 제한되었다. 하지만 저유황 연료를 적용하는 방법은 대형선박의 경우 과도한 연료비 증가로 인한 채산성 측면에서 한계를 가지고 있는 실정이다.

$\text{NO}_x$  및  $\text{SO}_x$ 에 대한 강화된 규제를 동시에 만족시키기 위해 다양한 연구가 진행되고 있으며, 특히 충분한 효율을 얻을 수 있고 운영비 측면에서 장점을 가지는 습식 스크러머가 주목받고 있다.

습식 스크러버에 대한 다양한 연구가 진행되고 있는데 스크러버의 분무 유량과 형상비 그리고 충진율에 의한 스크러버 성능에 대한 연구가 진행되고 있으며 손<sup>4)</sup>은 스크러버의 다양한 형상비와 충진율의 변화, 분무 유량을 다르게 한 스크러버 형상을 제시하였다. 김<sup>5)</sup>은 CFD해석과 PIV 실험을 통한 스크러버의 노즐위치 선정에 대한 연구를 진행하였다. 또한 고<sup>6)</sup>는 스프레이 시스템에서 분무되어지는 액적분포 면적향상을 위한 스프레이 시스템 최적 설계에 대한 수치 해석적 연구를 수행하였고, 조<sup>7)</sup>는 스크러버 내의 액적 분사 형태에 따른 압력 손실과 가스처리 효율에 대한 CFD 해석을 실시하였다. 선박의 크기에 따른 연구도 실행되고 있으며, 허<sup>8)</sup>는 중대형 선박용 스크러버 시스템 설계를 위한 전산해석 연구를 진행하였고, 손<sup>9)</sup>은 중소선박용 습식 스크러버의 최적설계에 대한 연구를 실시하였다. 이<sup>10)</sup>는 액적 제거기를 설치하여 전후의 액적 양을 비교함으로써 습식스크러버 적용시 문제가 되는 액적의 캐리오버 문제를 개선하는 연구를 실시하였다. 이<sup>11)</sup>의 연구에서는 자성유체를 이용하여 NOx와 SOx를 제거하는 스크러버 개발을 진행하였고, 박<sup>12)</sup>,김<sup>13)</sup>은 NOx, SOx의 저감을 위해 산화제를 이용한 실험을 실시하였으며, 한<sup>14)</sup>은 펄스 플라즈마로 변환된 NO<sub>2</sub>가스를 NaSO<sub>3</sub> 수용액을 분사하여 저감하는 실험을 실시하였다.

## 1.2 연구 목적 및 내용

선박용 디젤엔진의 배기가스 규제는 점차 강화되고 있으며, 규제에 관한 많은 기술개발 및 연구가 진행되고 있다. 그중에서도 저감효율 및 운용비 측면에서 장점을 가지는 습식 스크러버가 주목 받고 있고 다양한 연구가 진행되고 있다. 하지만 수많은 연구에도 불구하고 선박 설치를 위한 소형화에는 많은 어려움이 있으며, 같은 체적 내에서 효율을 극대화 할 수 있는 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 스크러버 내부에 설치된 가이드베인을 이용하여 와유동을 일으켜 동일 체적에서 더 큰 효율을 얻고자 하였고 전산 해석과 실험 결과를 바탕으로 본 스크러버의 최적화된 각도를 찾고자 한다.

전산적 해석으로서 선행연구<sup>15)</sup>와 더불어서 배기가스 저감 효율 향상과 스크러버 소형화를 위하여 와유동을 유도하는 가이드를 스크러버 내부 유입구에 설치하였으며 가이드 베인의 각도( $0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$ )에 따른 배기가스 유동, 접촉거리, 세정수 분포 및 배기 압력에 미치는 영향을 분석하여 최적의 가이드 각도를 제시하고자 한다.

전산 해석을 통해 얻은 결과를 바탕으로 실험 장치를 구성하였으며, 3300cc급 상용 디젤엔진에 적용 가능한 스크러버를 설계 제작하였다. 스크러버 효율을 나타내는 연료 소모시간, 배기가스 온도, 배기 압력, NOx 저감률을 확인하였고, 엔진속도 700RPM, 1000RPM, 1300RPM, 1600RPM과 엔진 부하 Idle, 25%, 50%, 75%, 100%, 가이드베인 각도  $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$ 의 조건에서, 충전물을 넣은 경우와 넣지 않은 경우에 대하여 실험을 실시하였다. 충전물의 양은 세정수가 분무될 때 골고루 분포 될 수 있는 최대의 양인 6L를 100%로 산정하였다.

## 제 2 장 스크러버 내부 유동에 관한 CFD 해석

### 2.1 수학적 모델 및 계산 조건

#### 2.1.1 수학적 모델

스크러버 내부 유동계산에 적용된 전달 방정식은 다음과 같다.

연속 방정식은

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2-1)$$

모멘텀 방정식은

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2-2)$$

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U \quad (2-3)$$

에너지 방정식은

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \tau : \nabla U + S_E \quad (2-4)$$

여기서  $U$ 는 속도벡터,  $\tau$ 은 응력 텐서,  $S_M$ 은 운동량 생성항,  $T$ 은 온도,  $\delta$ 은 단위행렬,  $\rho$ 은 밀도,  $h$ 은 비정상 엔탈피,  $\lambda$ 은 열 전도도,  $S_E$ 은 에너지 생성항을 나타낸다.

난류계산은 SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다.

방정식은 다음과 같다.

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (2-5)$$

$$\arg_1 = \min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' w y}, \frac{500v}{y^2 w}\right), \frac{4\rho k}{CD_{kw}\sigma_{u2}y^2}\right) \quad (2-6)$$

여기서  $y$ 는 벽과의 거리를 나타내며,  $v$ 는 동점성 계수를 나타낸다

$$CD_{kw} = \max\left(2\rho \frac{1}{\sigma_{w2} w} \nabla k \nabla w, 1.0 \times 10^{-10}\right) \quad (2-7)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (2-8)$$

$$\arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^2\omega y}, \frac{500v}{y^2\omega}\right) \quad (2-9)$$

이다.



### 2.1.2 스크러버 구조 및 계산조건

스크러버의 구조는 외부영역과 내부영역으로 구분되며 엔진 배기가스가 유입되는 외부영역은 와유동을 발생시키기 위하여 원통을 채택하였고 내부영역은 외부영역을 지난 배기가스에 새로운 와유동을 발생시키기 위하여 내부영역 유입구멍에 가이드 배인을 설치하였다.

계산조건으로서 Fig.2.1은 외부직경 300mm 내부직경 200mm 높이1,425mm의 크기를 가지는 스크러버를 나타낸다, Fig.2.2는 내부 배기가스 유입구를 나타내고 크기는 15mm 개수는 52개이다. Fig.2.3은 내부 유입구를 지난 배기가스의 와유동을 유도하기위한 60° 가이드라인이며 가이드라인의 각도는 각각 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° 이다. Fig.2.4는 ICEM-CFD를 이용하여 스크러버 모델에 격자를 생성한 그림이며, 격자의 개수는 모든 스크러버의 경우에서 약 30,000,000개 정도를 유지 하였다. Fig.2.5는 스크러버의 구조를 상세히 표시한 것으로 외부영역과 내부영역을 나타낸다. Table 1은 해석에 적용되는 Input Data이며 배기가스의 입구와 출구, 세정수가 분무되는 노즐과 세정수의 출구를 나타내는 표이다. 배기가스 입구는 직경 63.6mm, 속도 22.4m/s의 조건을 주었고, 배기가스 출구는 100mm, Outlet의 조건을 주었으며, 노즐은 Full Cone Nozzle Type을 이용하고, 직경 3mm, 세정수 분사속도는 6.36m/s를 주었다. 세정수 출구는 벽으로 설정하였으며, 물이 닿으면 모두 흡수되는 조건을 주었다



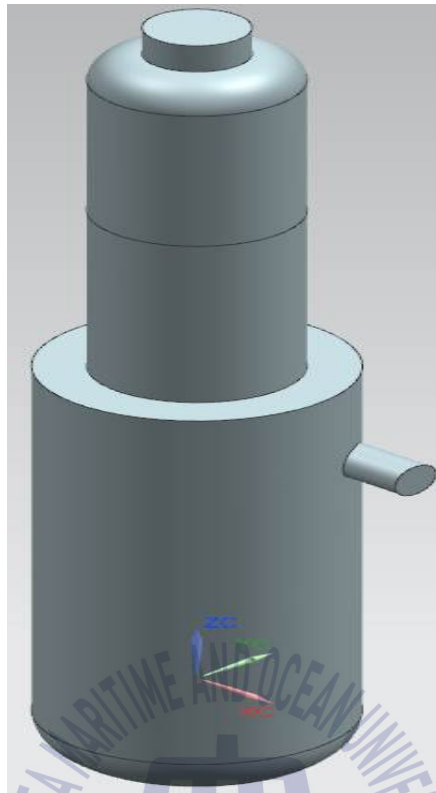


Fig. 2.1 Scrubber modeling

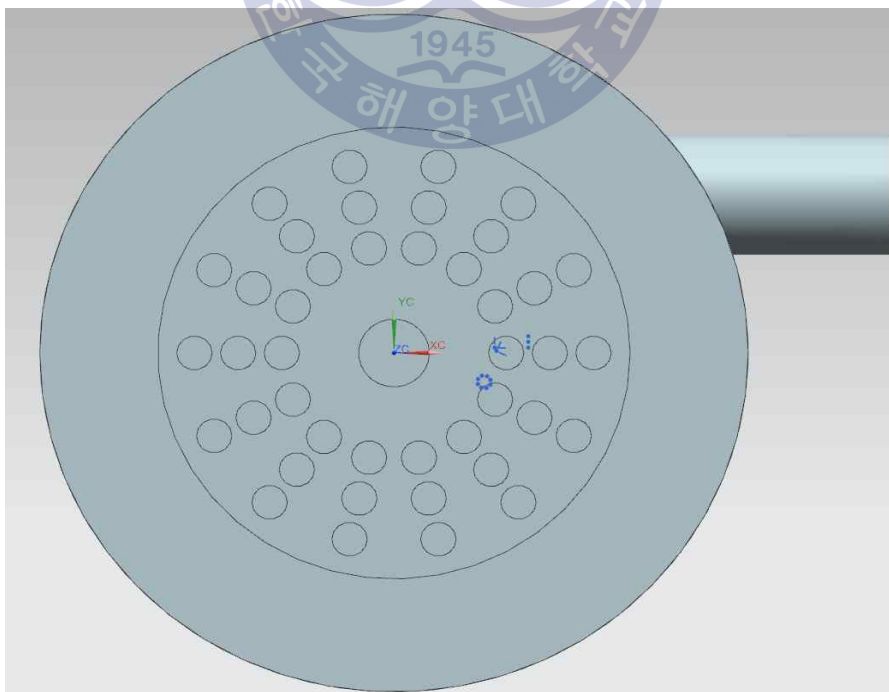


Fig. 2.2 Scrubber inlet holes

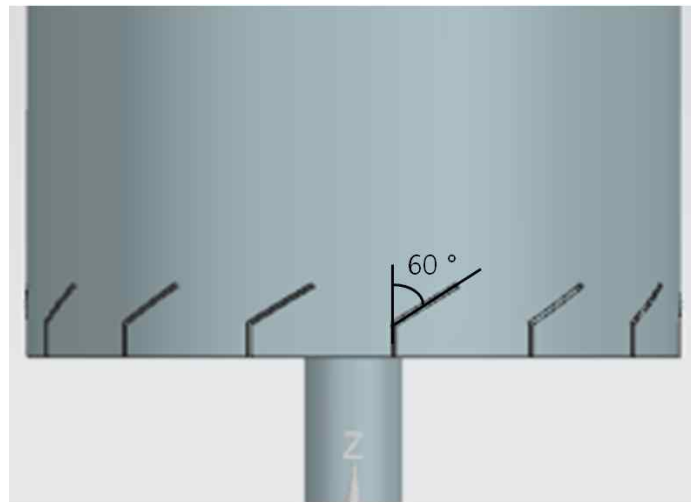
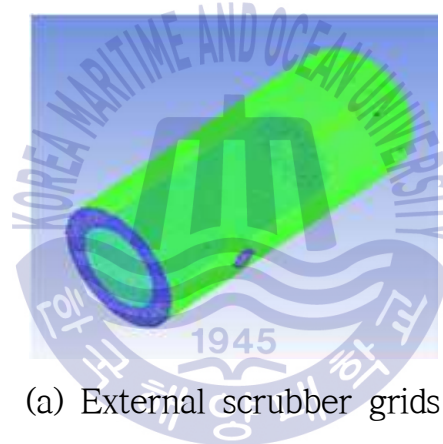
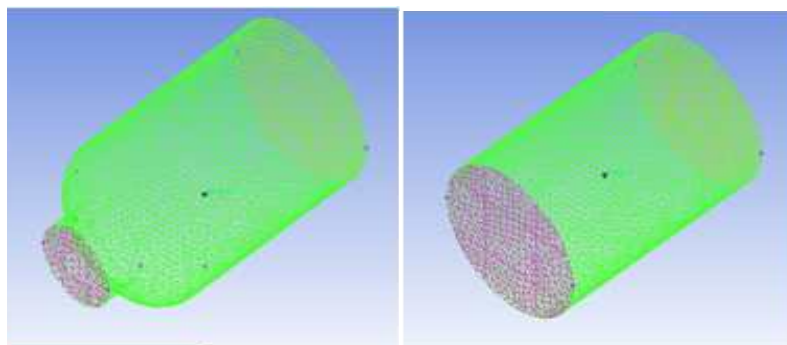


Fig. 2.3 Guide vane at 60°



(a) External scrubber grids



(b) Top Scrubber grids

Fig. 2.4 Scrubber grids

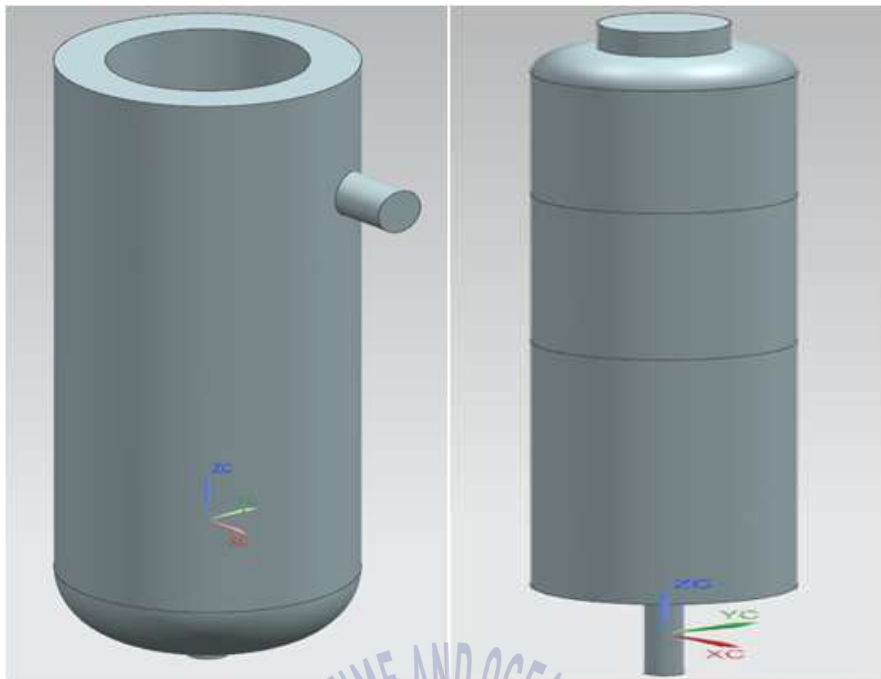


Fig. 2.5 External and Internal area in Scrubber

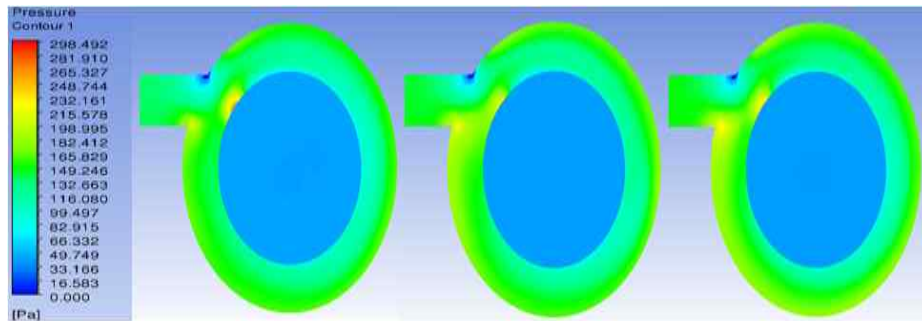
Table 1 : Input data for scrubber simulation

	Diameter	Boundary Condition
Air inlet	63.6mm	Inlet gas velocity 22.4m/s
Air outlet	100mm	Outlet
Water inlet	3mm	Nozzle velocity 6.36m/s
Water outlet	50mm	wall

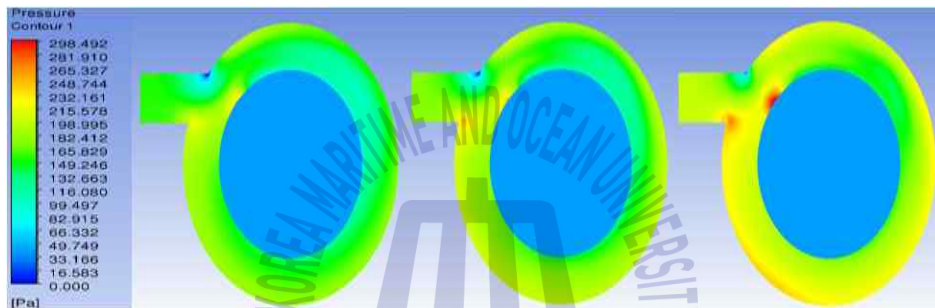
## 2.2 전산 해석 결과 및 고찰

### 2.2.1 압력 분포 특성

Fig.2.6는 배기가스 입구높이의 수평 단면 압력 분포이다. 날개의 각도가 증가하면서 내부압력에는 변화가 없지만 외부압력은 크게 증가된다. 스윙 유동의 원심력을 받는 가장자리에 높은 압력이 나타내며, Fig.2.7은 가이드 베인의 각도  $0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  에서 스크러버 전체의 수직 단면 압력 분포를 나타낸다. 가이드 각도가 증가함에 따라 외부영역의 압력이 증가함을 나타낸다. 외부 영역의 가장자리에서 최댓값을 나타내며 하부중심축 부위에서는 압력이 낮아진다. 모든 경우에 내부영역의 압력은 100Pa 이하의 낮은 압력을 나타낸다. Fig.2.8은 날개 각도에 따른 외부 평균 압력 변화를 나타낸다. 외부 평균 압력은  $0^{\circ}$  일 때 131 Pa에서  $45^{\circ}$  일 때 150 Pa로 소량 증가하지만,  $60^{\circ}$  부터 크게 증가하여  $75^{\circ}$  일 때 193Pa이 된다. 결과적으로 각도가 커질수록 배기압력은 증가하지만  $45^{\circ}$  이후부터는 급격하게 증가하는 모습을 보인다

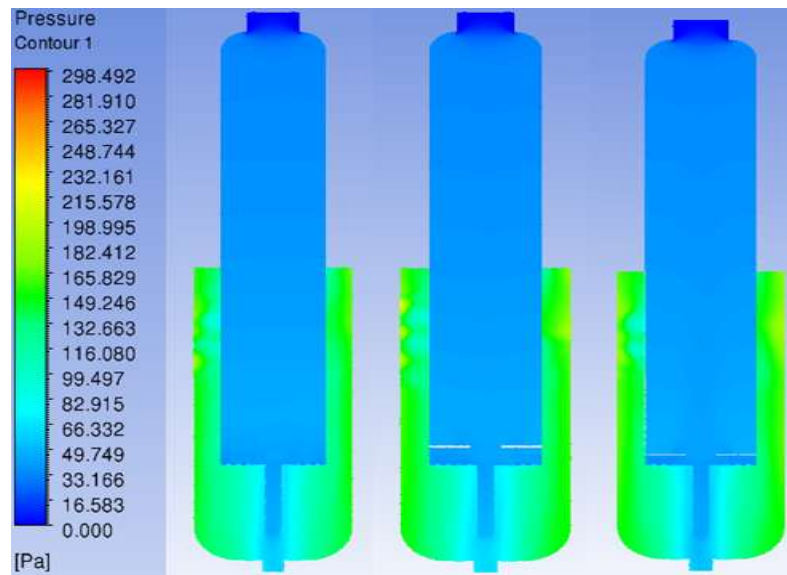


(a) at ( $0^\circ$  ,  $15^\circ$  ,  $30^\circ$  )

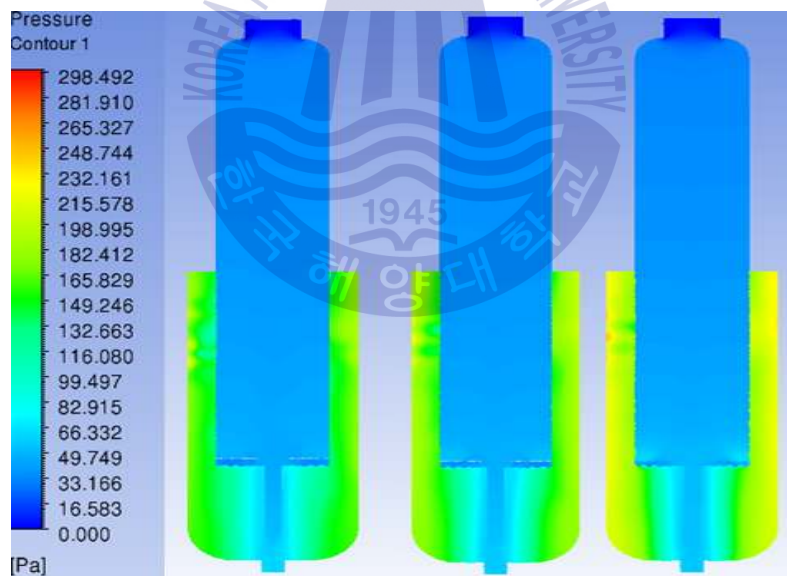


(b) at ( $45^\circ$  ,  $60^\circ$  ,  $75^\circ$  )

Fig. 2.6 Pressure distribution of horizontal section



(a) at ( $0^\circ$  ,  $15^\circ$  ,  $30^\circ$  )



(b) at ( $45^\circ$  ,  $60^\circ$  ,  $75^\circ$  )

Fig. 2.7 Pressure distribution of vertical section

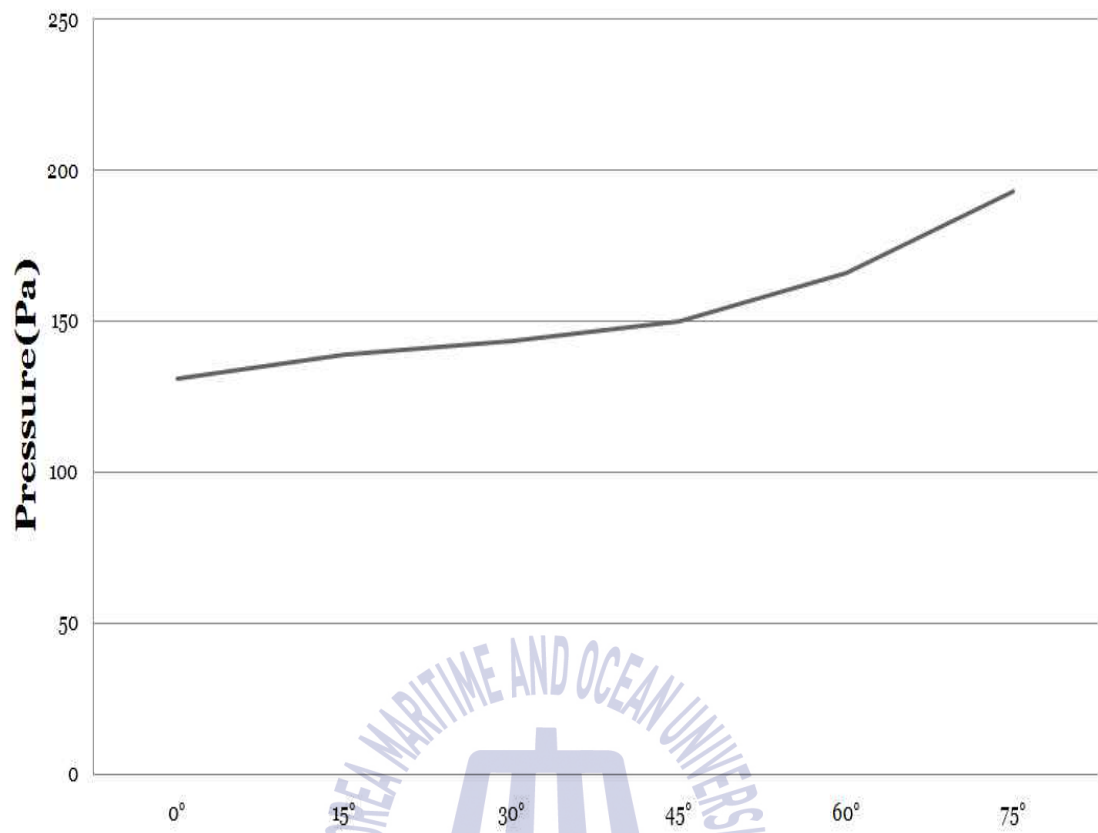
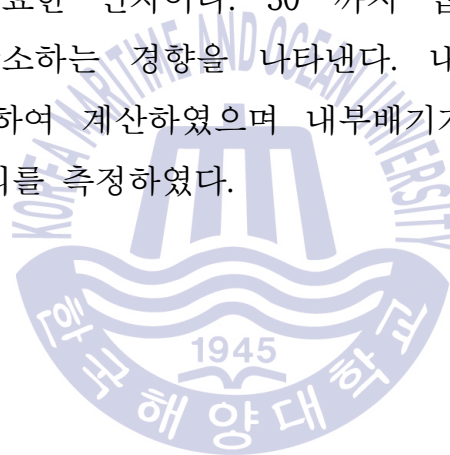


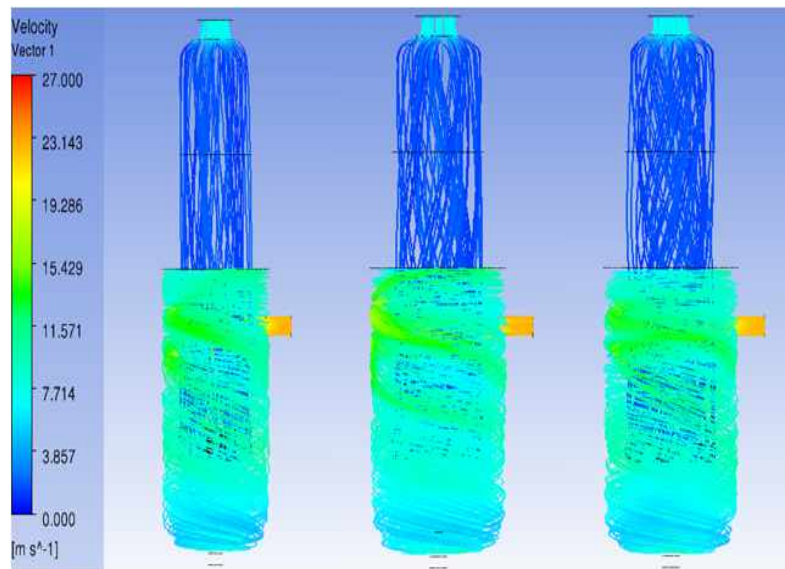
Fig. 2.8 Pressure variation of guide vane angle

### 2.2.2 배기가스 유동 특성

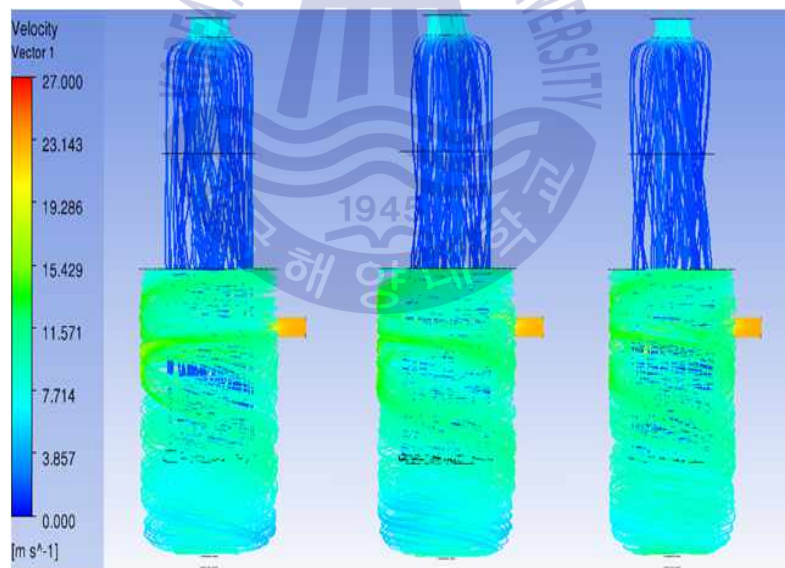
Fig.2.9은 스크러버 전체의 배기가스의 흐름을 스크러버 전체의 수직 단면으로 나타낸 그림이다. 외부 통로에 접선으로 들어온 가스가 회전운동을 하면서 하부로 내려가는데 내부 배기가스 유입구멍을 지나기 전까지의 외부영역에서는 날개의 각도가 증가하면서 회전수가 증가된다. Fig.2.10는 내부 영역에서의 배기가스 흐름을 수직 단면으로 나타낸 그림이다. 배기가스는 날개의 각도에 따라 회전운동을 하면서 유입되는데  $0^{\circ}$ 에서는 와유동이 없으며  $45^{\circ}$ 에서 최대가 되고  $75^{\circ}$ 에서는 감소하는 경향을 나타낸다. Fig.2.11은 내부 배기가스의 이동거리를 나타낸다. 배기가스가 세정수와 접촉할 수 있는 거리를 나타낸 것으로 가장 중요한 인자이다.  $30^{\circ}$ 까지 급격히 증가되며  $45^{\circ}$ 에서 최댓값을 갖고 이후 감소하는 경향을 나타낸다. 내부 배기가스 이동거리는 CFD-POST 기능을 이용하여 계산하였으며 내부배기가스 유입구멍을 시작으로 배기가스 출구까지의 거리를 측정하였다.





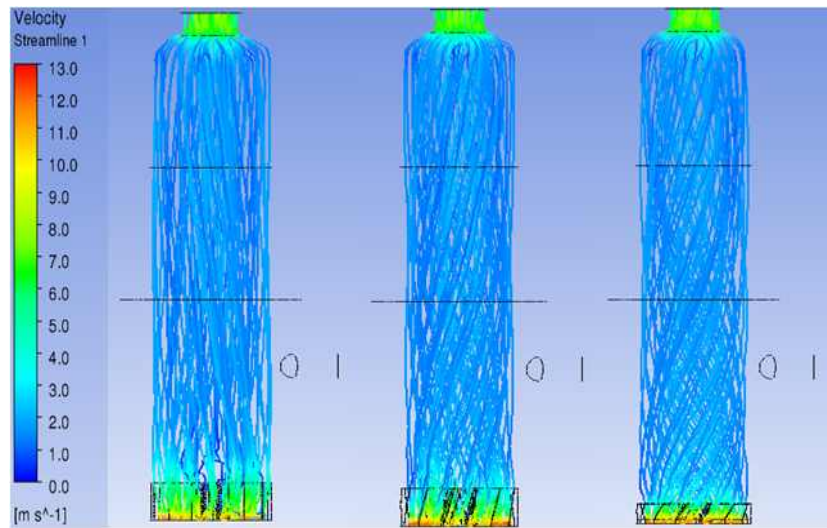


(a) at ( $0^\circ$  ,  $15^\circ$  ,  $30^\circ$  )

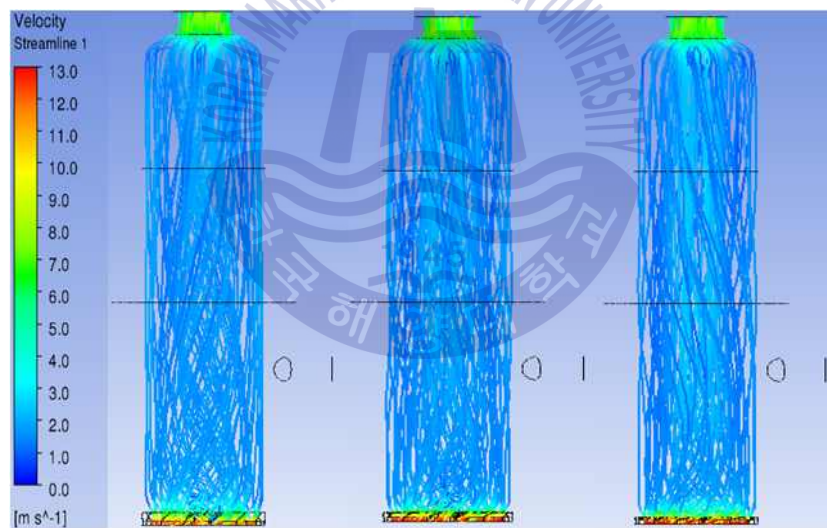


(b) at ( $45^\circ$  ,  $60^\circ$  ,  $75^\circ$  )

Fig. 2.9 Streamlines of exhaust gas



(a) at ( $0^\circ$  ,  $15^\circ$  ,  $30^\circ$  )



(b) at ( $45^\circ$  ,  $60^\circ$  ,  $75^\circ$  )

Fig. 2.10 Exhaust gas streamlines in internal area

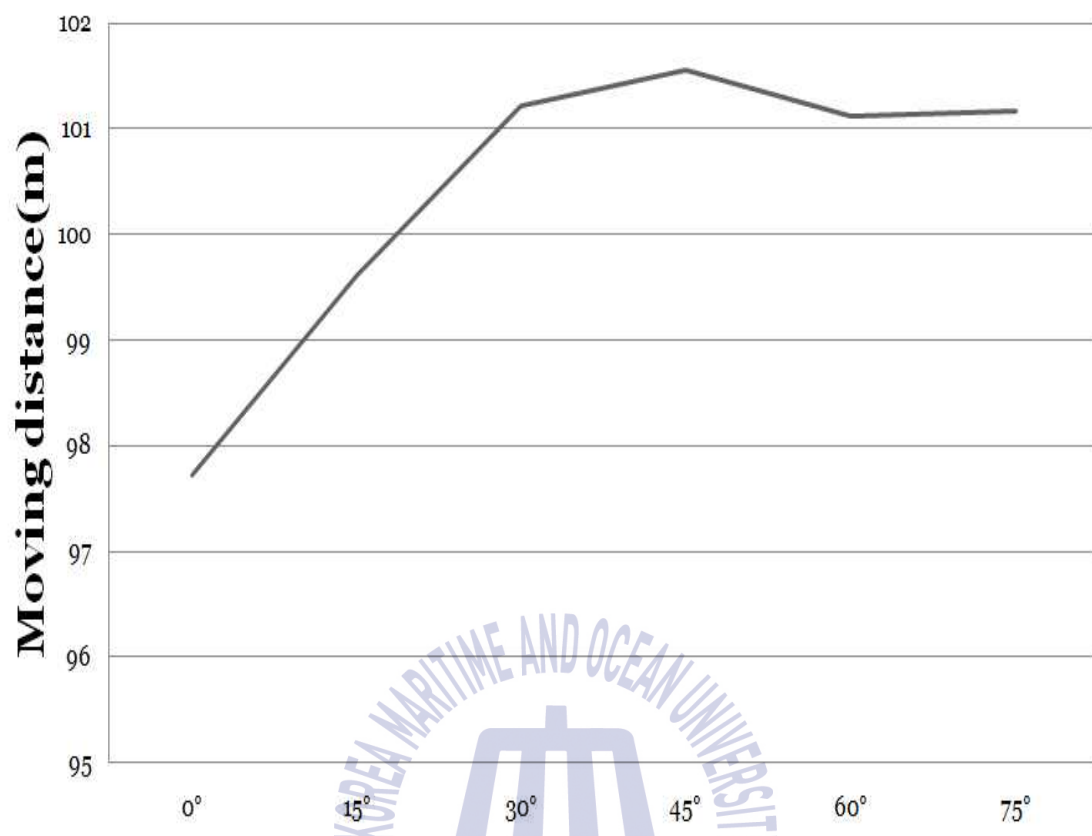
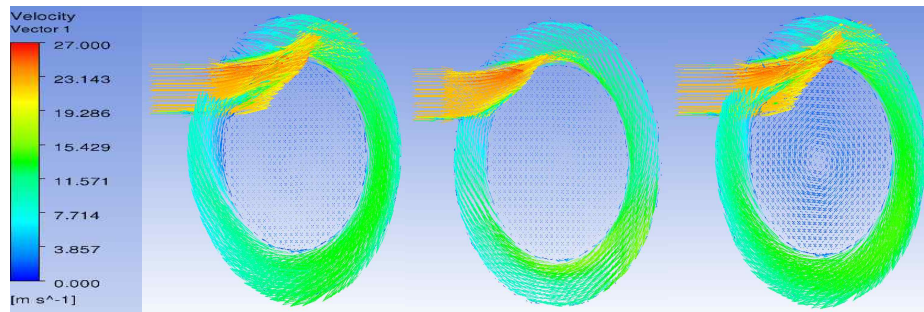


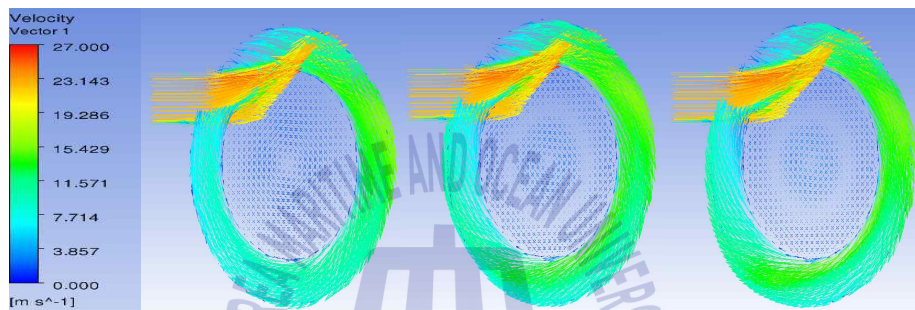
Fig. 2.11 Moving distance of internal area

### 2.2.3 속도 분포 특성

Fig.2.12는 가이드 각도  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  일 때 배기가스 입구에서 스크러버 전체의 수평 단면 속도 분포를 나타낸다. 배기가스 입구에서의 속도는  $22.4\text{m/s}$  가장자리 벽면 부근에서 국부적으로 평균  $26\text{m/s}$  까지 증가하는 것을 확인하였다. Fig.2.13은 가이드 각도  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  일 때 스크러버 전체의 수직 단면 속도 분포를 나타낸다. 스크러버 외부영역으로 유입된 배기유동은 상부에 강한 와 유동을 동반하면서 하부로 내려가고 바닥 근처에서 가이드 날개가 있는 상부로 이동하여 가이드 날개를 통과한 후에 내부영역의 속도가 크게 줄어든다. Fig.2.14는 가이드 날개(guide vane) 전후의 가스유동에 대한 수평 단면 속도 분포를 나타낸다. 가이드날개 직전과 날개 영역에서는 가이드 각도의 증가와 비례하여 와유동이 증가하지만, 날개 후단의 경우는  $0^\circ$  에서  $30^\circ$  까지 증가된 후에  $45^\circ$  부터 감소하는 경향을 나타낸다. 전후단의 유동을 종합하면 스월유동이 가장 활성화된 조건은  $30^\circ$  에서  $45^\circ$  사이인 것으로 판단된다. 각 그림은 수평단면을 나타낸 그림이며 그림에서의 화살표의 크기가 커질수록 수평적인 힘 즉 와유동이 커진다고 판단된다.



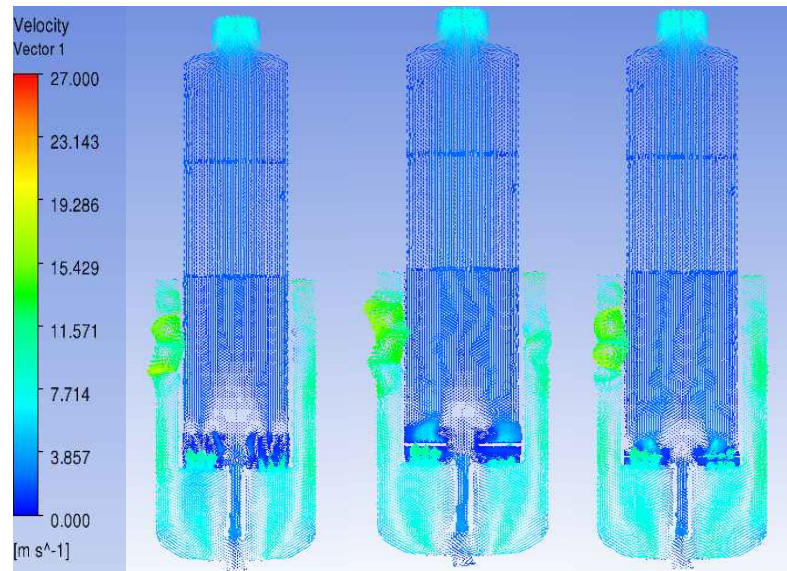
(a) at (0° , 15° , 30° )



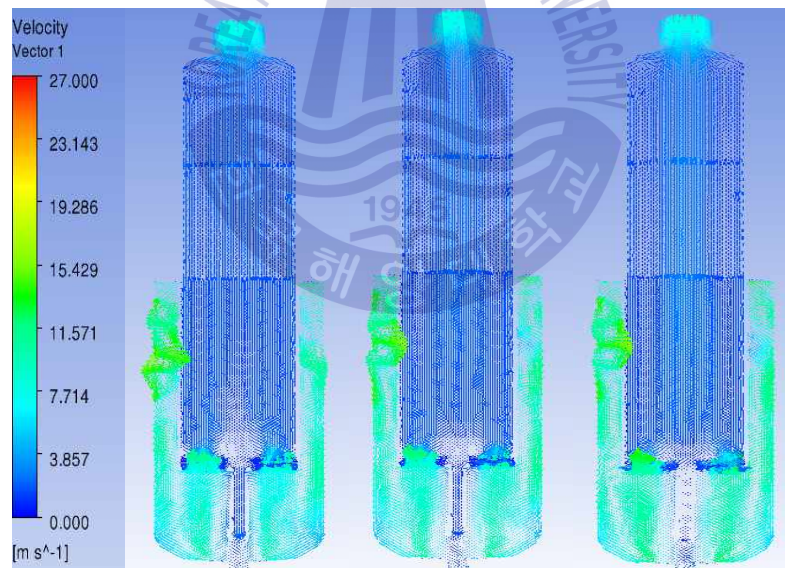
(b) at (45° , 60° , 75° )

Fig.2.12 Vector distribution of horizontal section



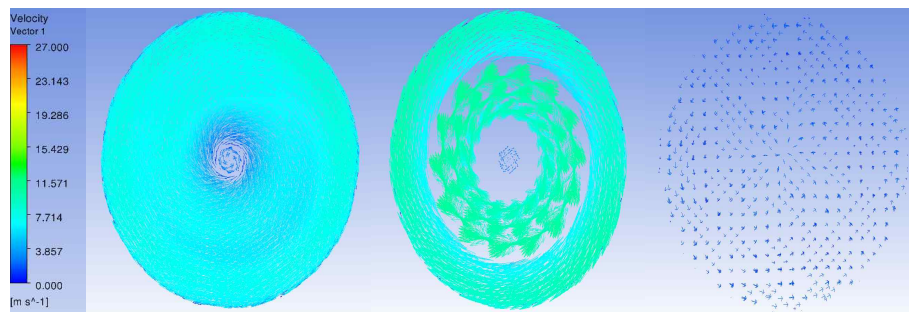


(a) at (0° , 15° , 30° )

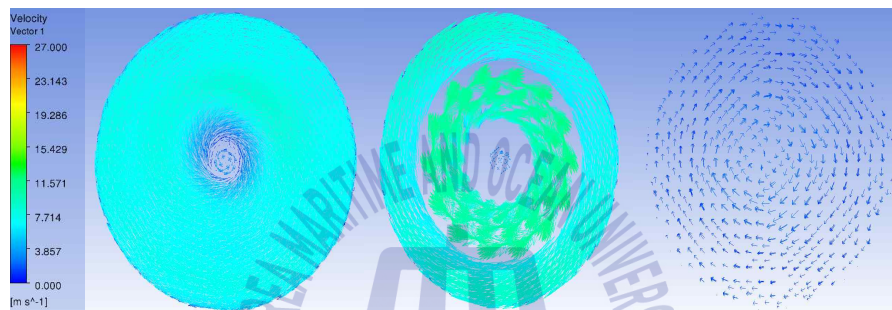


(b) at (45° , 60° , 75° )

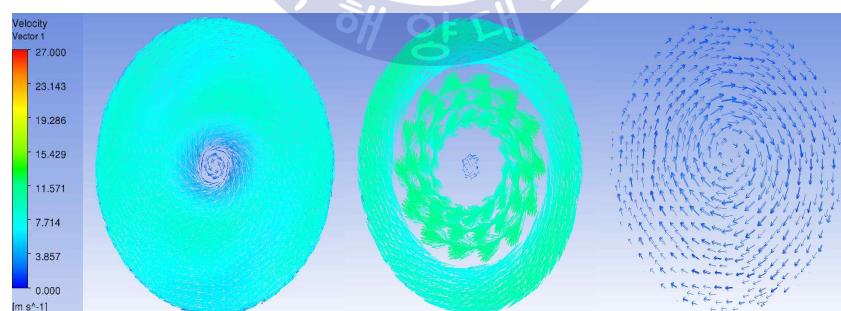
Fig. 2.13 Vector distribution of vertical section



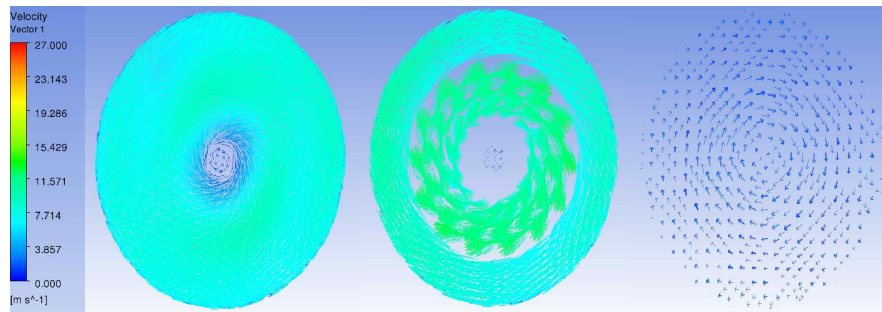
(a) at 0°



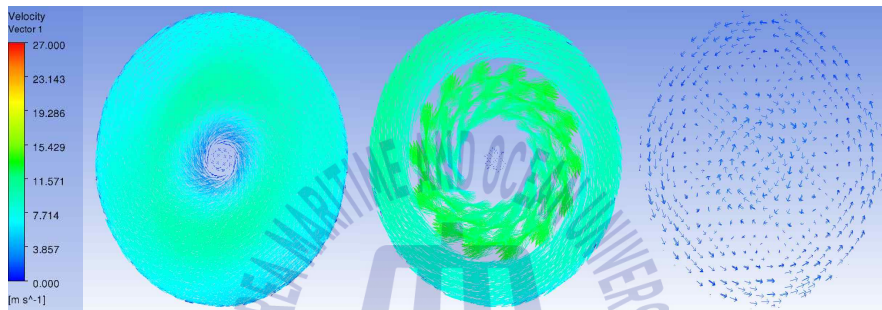
(b) at 15°



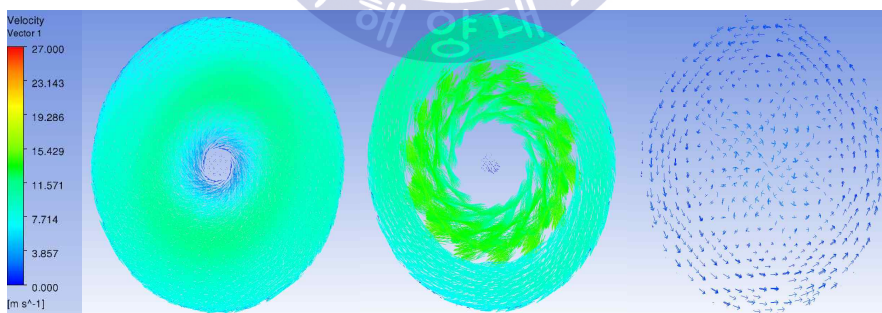
(c) at 30°



(d) at 45°



(e) at 60°



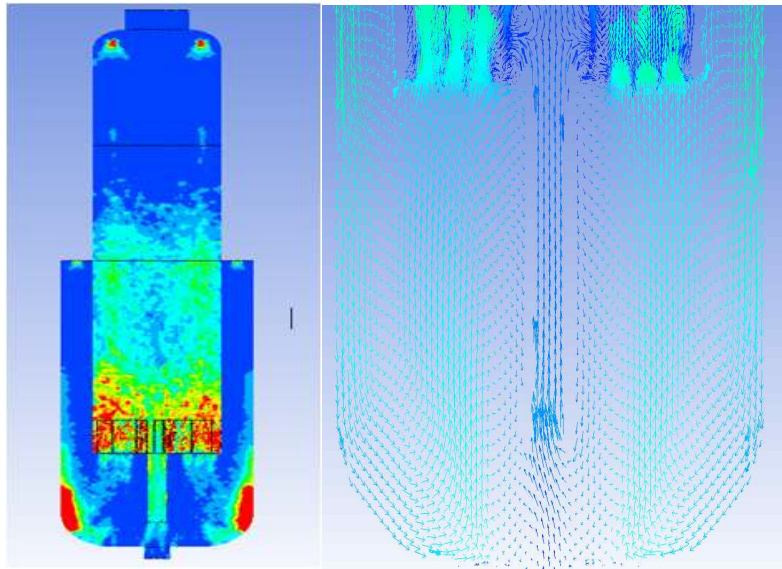
(f) at 75°

Fig. 2.14 Gas flow vector distribution in the horizontal section

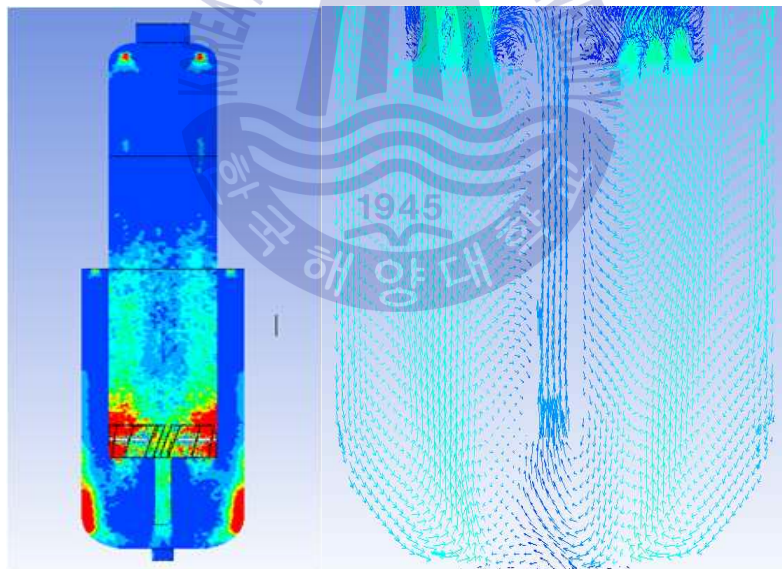


#### 2.2.4 세정수 분포 특성

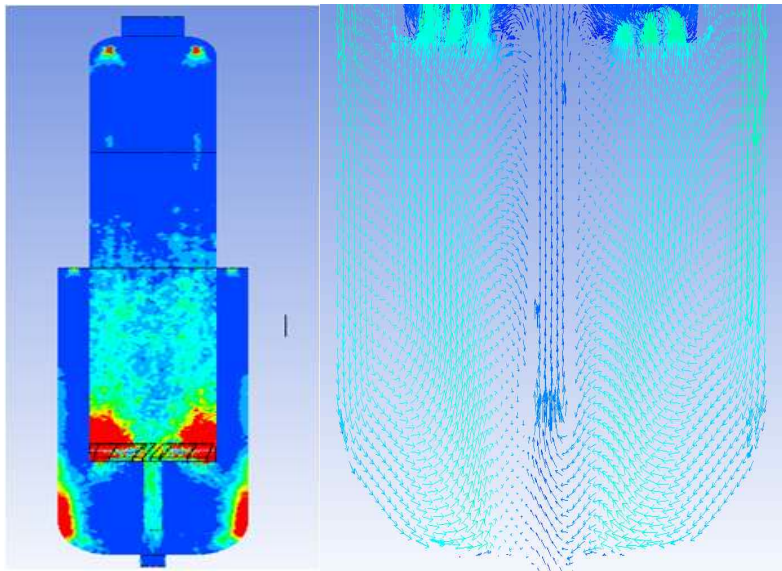
Fig.2.15는 가이드 날개 각도가  $0^{\circ}$  에서  $75^{\circ}$  까지 변화 할 때의 세정수 분포와 스월판 하부의 유동속도를 나타낸다. 세정수는 외부영역 상부에 4개, 내부영역 상부에 4개의 물 분사 노즐에서 분사된다. 외부영역에서 분사된 세정수 액적들은 배기가스의 강한 스월 유동의 영향으로 가장자리로 밀리면서 아래로 내려간다. 하부 가장자리에 모인 세정수의 일부는 유동을 따라 스크러버 내부영역으로 유입되는데, 가이드 날개  $0^{\circ}$  의 경우는 바닥에서 거의 수직으로 올라와 유입되고 각도가 증가하면서 유입각도도 증가하여 거의 수평 방향으로 유입된다. 한편 내부에서 분사된 세정수는 스월판 근처에 쌓이면서 높은 농도를 나타낸다.  $0^{\circ}$  의 경우 세정수 분포가 하부에 집중되지 못하며 날개각도가  $45^{\circ}$  이상이 되면 스월판 상부 전체를 채우게 된다. 즉 날개각도가  $0^{\circ}$  에서  $30^{\circ}$  일 때는 스월판의 중심으로 유입된 배기가스가 상부로 빠르게 유동을 하면서 세정수와 혼합되지 못하고 배출된다. 각도가  $45^{\circ}$  이상이 되면 유입된 배기가스는 외부의 충분한 와유동에 의하여 스월판에 균일하게 분포되어 세정수와 잘 혼합되고 접촉면적이 크게 증가할 것으로 판단된다.



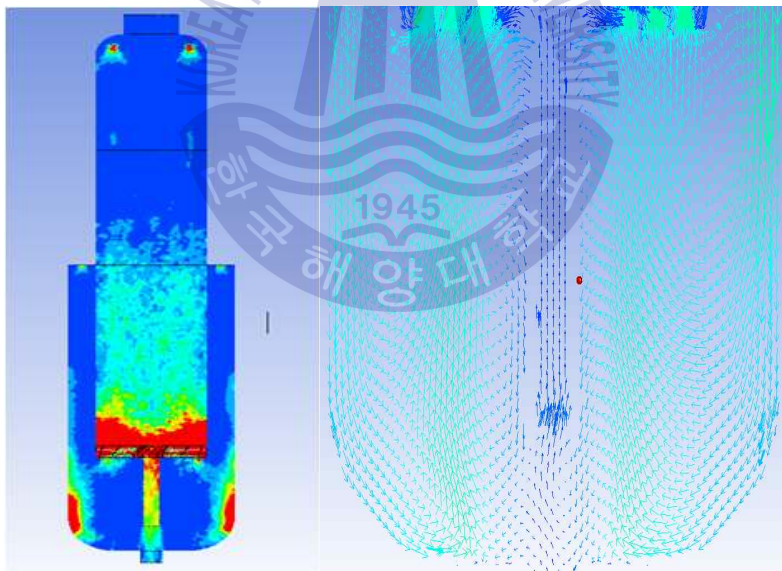
(a) at  $0^\circ$



(b) at  $15^\circ$

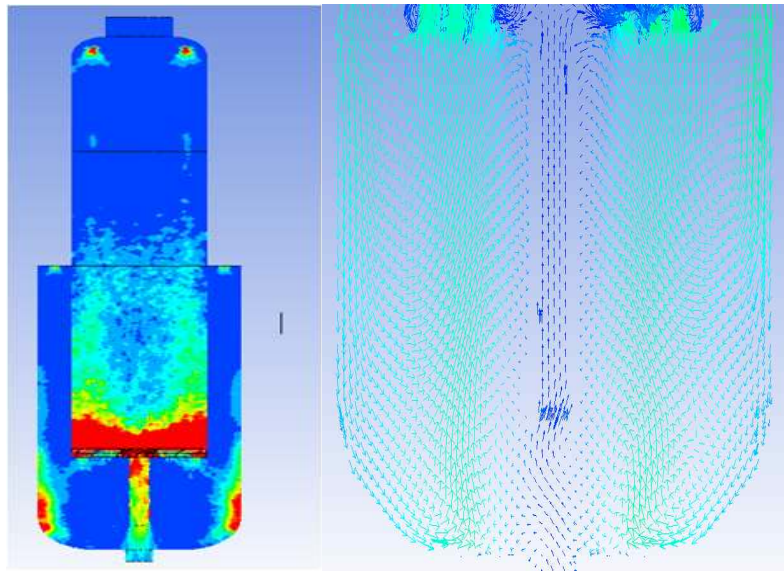


(c) at  $30^\circ$

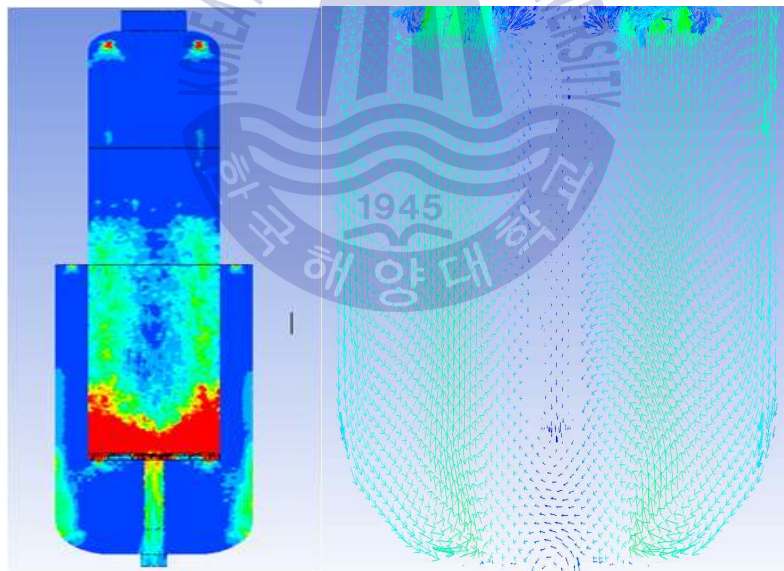


(d) at  $45^\circ$





(e) at  $60^\circ$



(f) at  $75^\circ$

Fig. 2.15 Cleaning water distribution and flow velocity under the guide vane

### 2.2.5 요약

가이드 배인 각도에 따른 스크러버 내부 유동에 관한 전산적 해석의 요약은 다음과 같다.

- 가이드 각도에 따른 배압특성은  $0^{\circ}$  에서  $45^{\circ}$  까지 서서히 증가 되지만  $60^{\circ}$  이상이 되면 크게 증가 되는 경향을 나타냈다.

- 스크러버 내부로 유입된 배기가스가 배출 될 때까지 이동한 거리, 즉 세정수와 접촉거리는 날개 각도가  $45^{\circ}$  때 최대가 되며 그 이상에서는 감소하는 경향을 나타냈다.

- 가이드날개 부근에서의 와유동 특성은 가이드날개의 전후단의 유동을 종합하였을 때  $30^{\circ}$  와  $45^{\circ}$  사이에서 가장 활성화되는 것으로 판단된다.

- 세정수 분포특성은 가이드 각도가  $45^{\circ}$  이상이 되면 충분한 와유동에 의하여 배기가스와 잘 혼합되고 접촉 면적이 크게 증가할 것으로 판단된다.

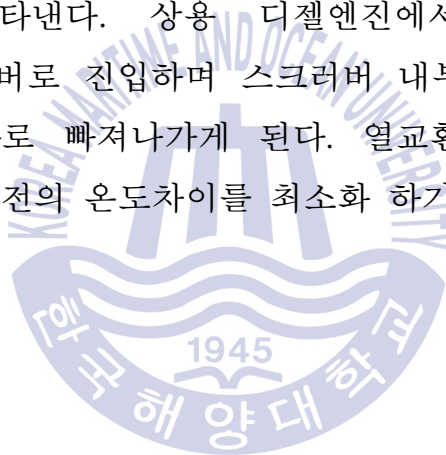
배압증가, 접촉거리, 와유동 및 세정수분포를 종합적으로 판단할 때 스월판 가이드 날개의 각도는  $45^{\circ}$  가 적당할 것으로 판단된다.

## 제 3 장 스크러버 내부 유동에 관한 실험

### 3.1 실험 장치 및 실험 조건

#### 3.1.1 실험장치 구성

앞서 실시한 전산해석의 결과를 고려하여 실험장치를 구성하였다. Fig.3.1은 실험 장치의 개략도를 나타낸다. Fig.3.2는 상용 디젤엔진(3300cc)과 배기가스 라인이며 Fig.3.3의 P1, P2, P3는 온도, 압력, 배기가스, Smoke를 측정하는 지점을 나타낸다. Table 2는 3300cc급 엔진의 스펙을 나타낸다. Fig.3.4는 실제 제작된 스크러버를 나타낸다. 상용 디젤엔진에서 배출되는 배기가스는 열교환기를 지나 스크러버로 진입하며 스크러버 내부에서 분사되는 세정수와 접촉하여 스크러버 외부로 빠져나가게 된다. 열교환기의 경우 엔진의 운전 조건에 의한 스크러버 직전의 온도차이를 최소화 하기 위해 설치하였다.



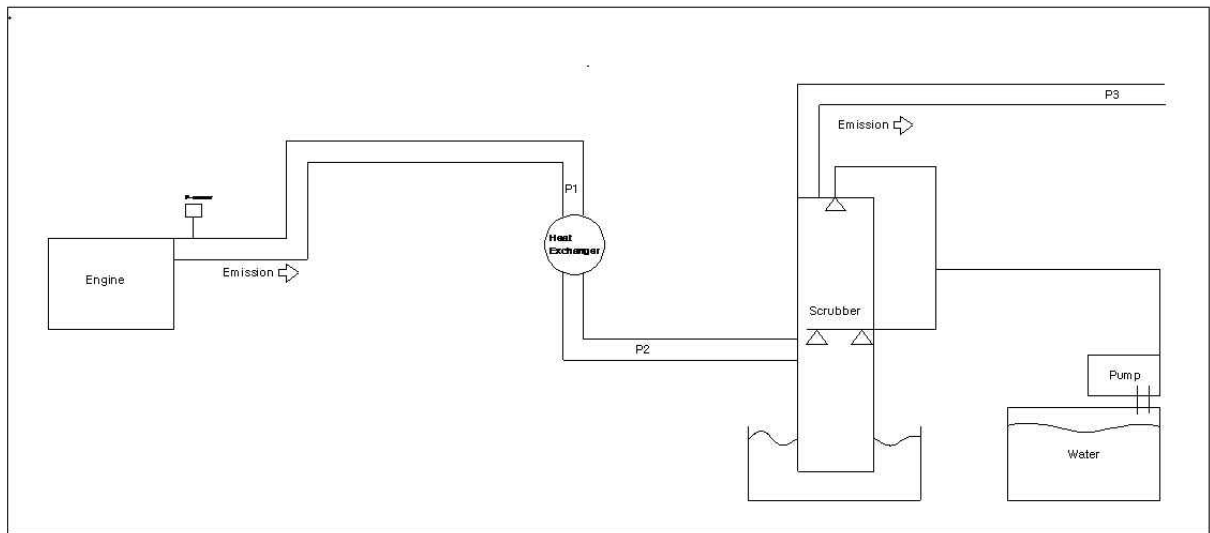


Fig. 3.1 Schematic of experiment system

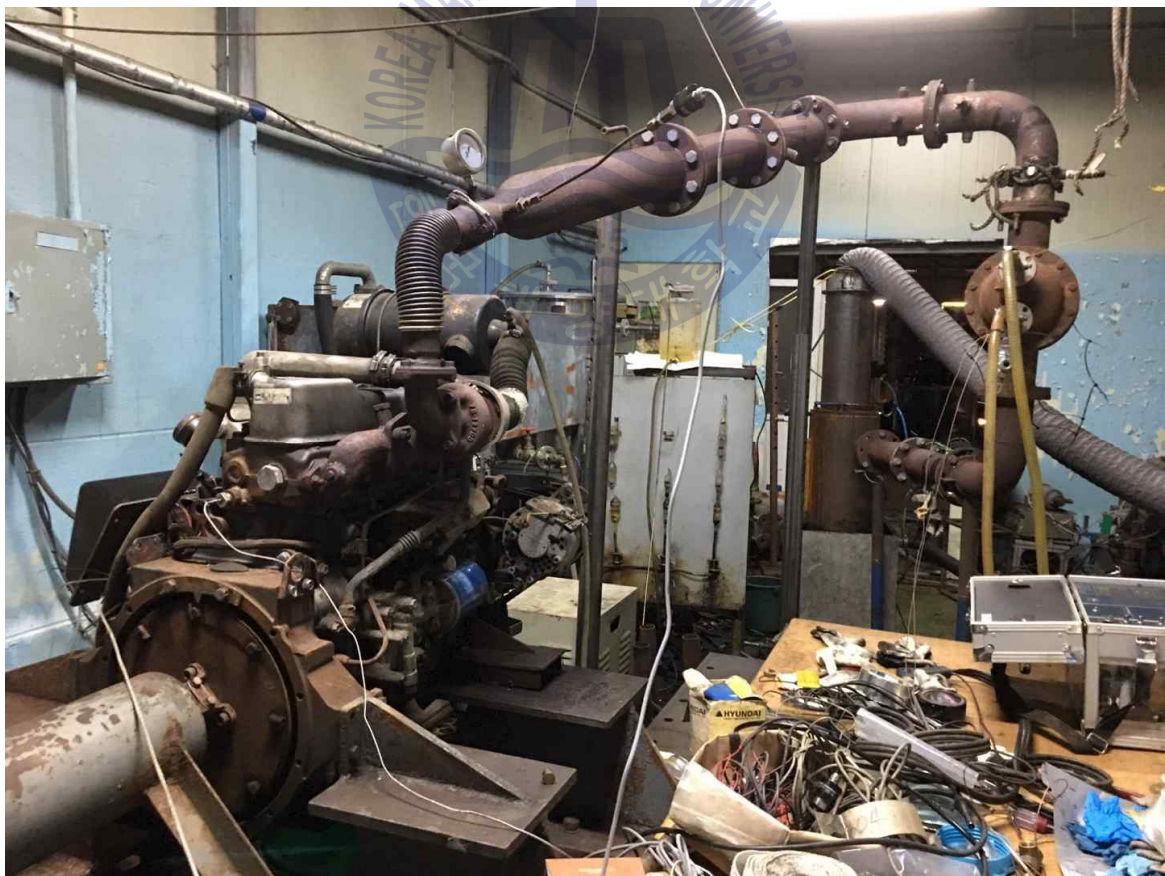


Fig. 3.2 Diesel engine and exhaust gas line





Fig. 3.3 Data measuring point of experimental system(from up to down, P1, P2, P3)





Fig. 3.4 Experimental scrubber

Table 2 Specifications of test engine

Type	Turbo diesel engine(D4AK-C)
Cooling method	Water cooler
No. of cyl. & arrangement	4-IN line
Valve mechanism	Overhead valve
Combustion chamber type	Direct injection
Bore X stroke	100mm X 105mm
Total piston displacement	3,298cc
Compression ratio	16:1
Rated output (KSR 1004)	80/2400(ps/rpm)
Peak torque (KSR 1004)	25.5/1800(kg.m/rpm)
NO-load minimum Speed	700~750 rpm
NO-load maximum Speed	2640±20 rpm
Firing order	1-3-4-2
Injection timing	16° ± 1° BTDC



### 3.1.2 실험 조건 및 방법

상용 디젤엔진의 회전 속도는 700, 1000, 1300, 1600RPM으로 선정을 하였고 수동력계에 의해 조절되는 엔진의 부하는 Idle, 25%, 50%, 75%, 100%로 선정을 하였다. 이러한 값을 Fig. 3.5으로 나타내었다. 다만 1600RPM에서의 부하 100%는 엔진 상태로 인해 실험을 진행 할 수 없었다.

스크러버 노즐의 분무 유량은 상부 1개 하부 4개의 노즐에서 18L/min의 유량을 가진다. 충전물(Fig. 3.6)의 양은 상부 노즐이 충전물 세정수가 골고루 분포 할 수 있는 최대의 양(6L)을 선정 하였으며 실험은 0%와 100%의 조건으로 실행되었다.

스크러버에 의한 배기압력은 SENSYS의 압력센서를 이용하여 측정하였으며, 배기가스의 성분 즉 배기가스의 변화 측정은 EUROTRON의 Greenline MK-2를 이용하여 측정하였고 배기온도는 OMEGA의 K-TYPE열전대를 이용하여 측정하였다. 또한 매연의 변화는 IYASAKA의 광투과식 매연 테스터(DS-4000Q)를 이용하여 측정하였다.(Fig. 3.7~3.10)

우선 충전율이 0%인 상태에서 가이드 베인의 각도  $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$ 의 조건으로 실험을 진행하였으며, 이 결과와 전산해석의 결과를 바탕으로 충전율 100%에서 비교를 할 수 있는 각도( $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$ )를 선정하여 실험을 진행하였다.

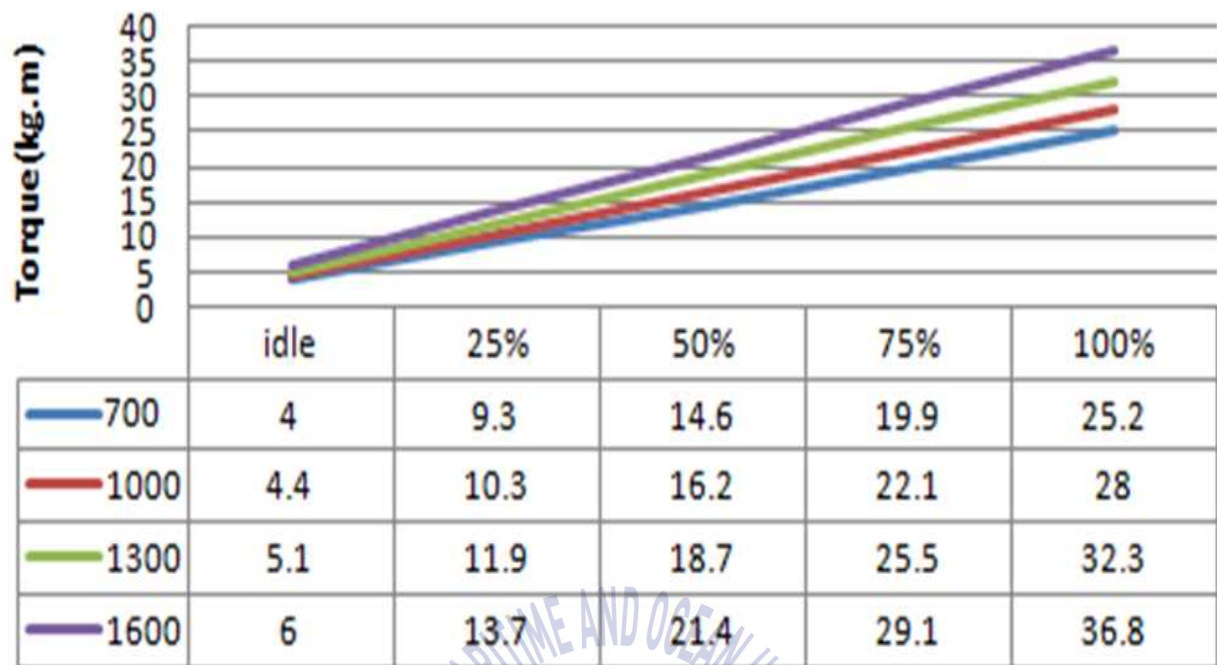


Fig. 3.5 Basic condition of engine for data acquisition



Fig. 3.6 Packing





Fig. 3.7 Pressure sensor



Fig. 3.8 Exhaust gas tester



Fig. 3.9 Temperature tester



Fig. 3.10 Smoke tester

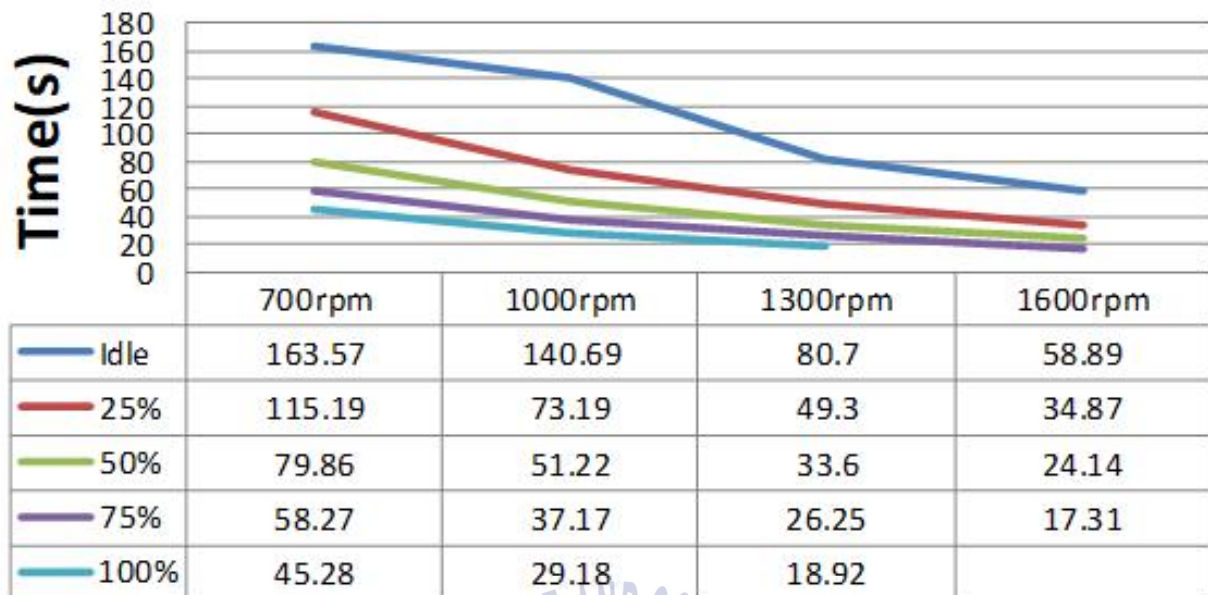
## 3.2 실험 결과 및 고찰

### 3.2.1 연료 소모시간

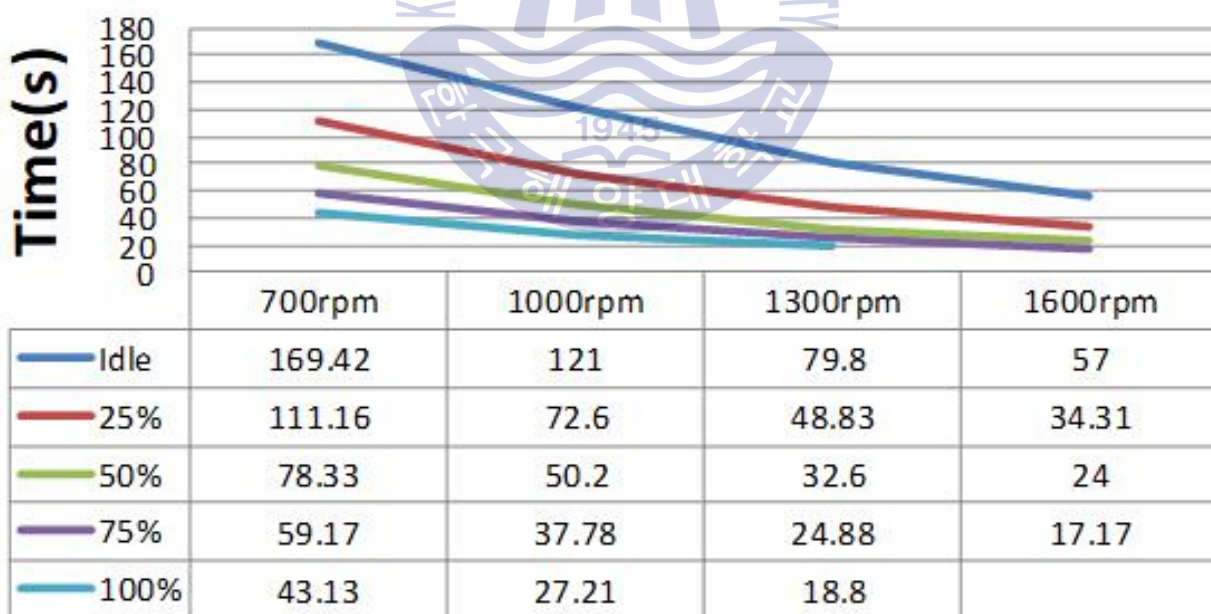
연료 소모시간은 엔진의 부하와, 엔진 속도가 증가 할수록 짧아지는 선형적인 모습을 보였다. Fig.3.11 는 충진율이 0%일 경우의 각도별 연료 소모시간이며, Fig3.12는 충진율 100%일 경우의 각도별 연료 소모시간이다.

각도에 의한 연료 소모시간의 차이는 크게 보이지 않으며, 충진율 차이에서의 연료 소모시간을 비교해 보았을 때 0%와 100%에서의 차이점은 크게 보이지 않는다. 이로서 충진율과 가이드 베인의 각도에 의한 연료 소모시간의 영향은 미비하다고 판단된다.



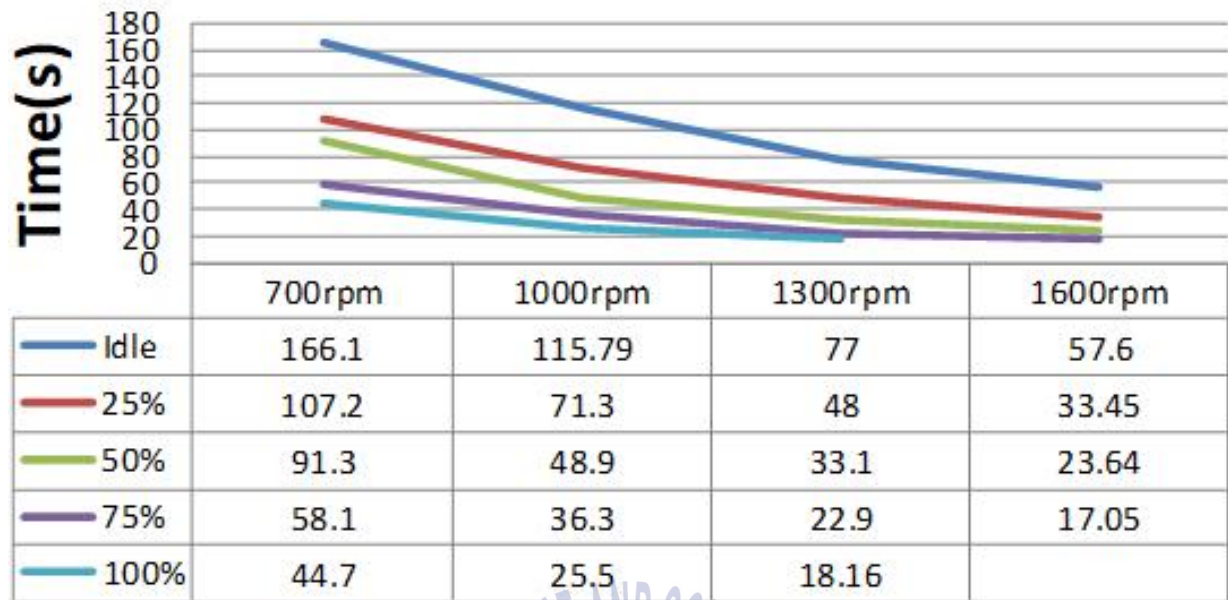


(a) at 0°

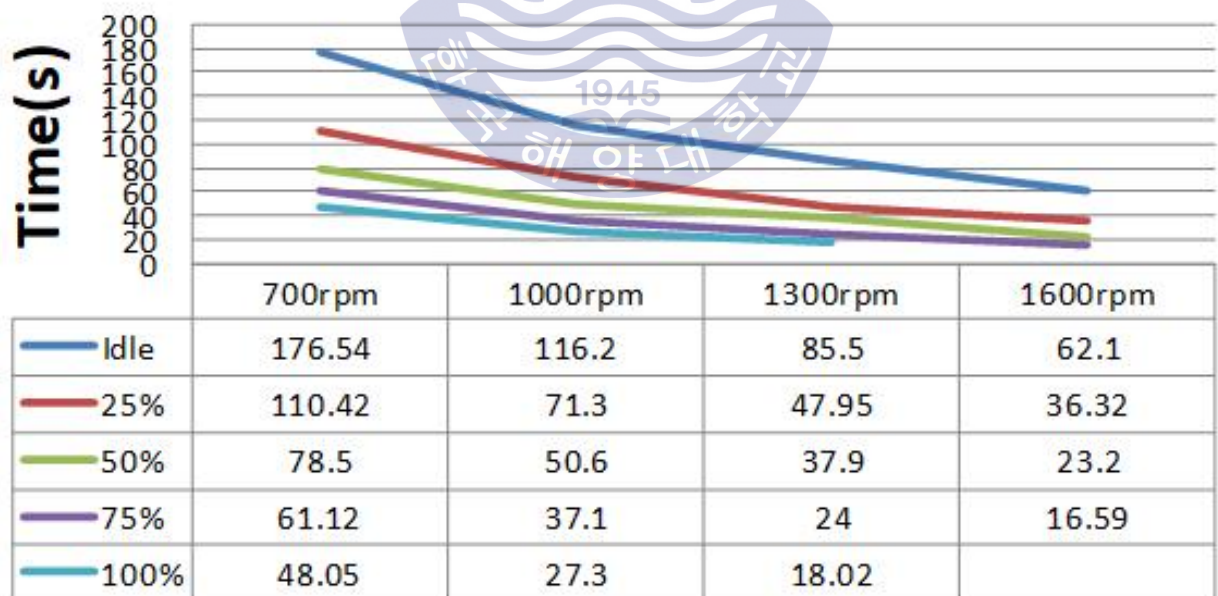


(b) at 30°

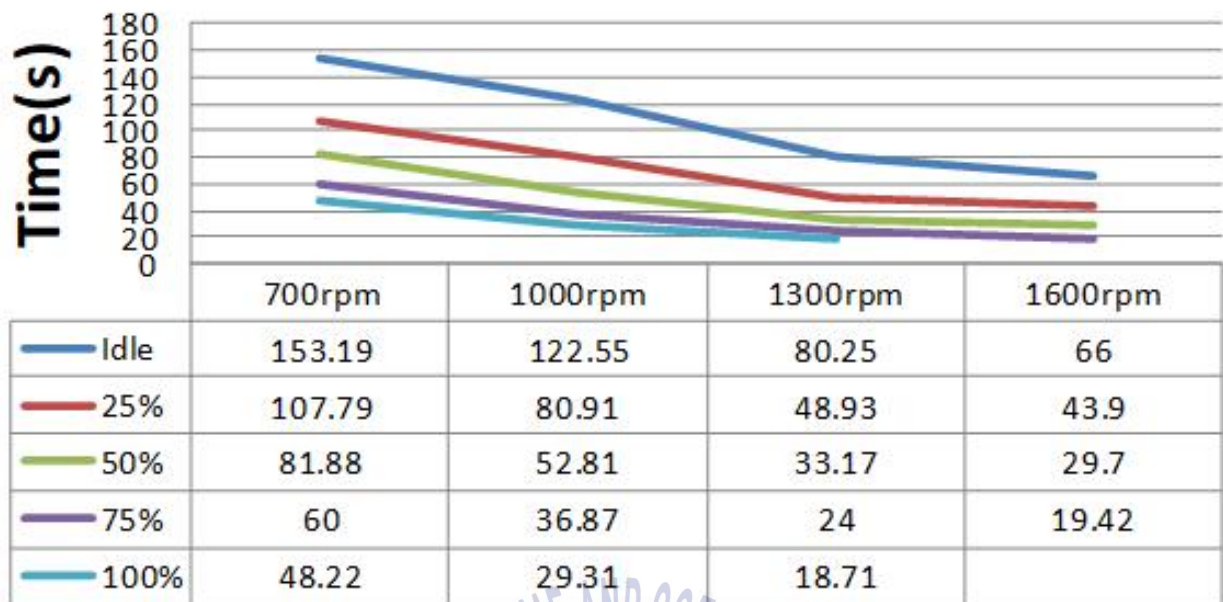




(c) at 45°

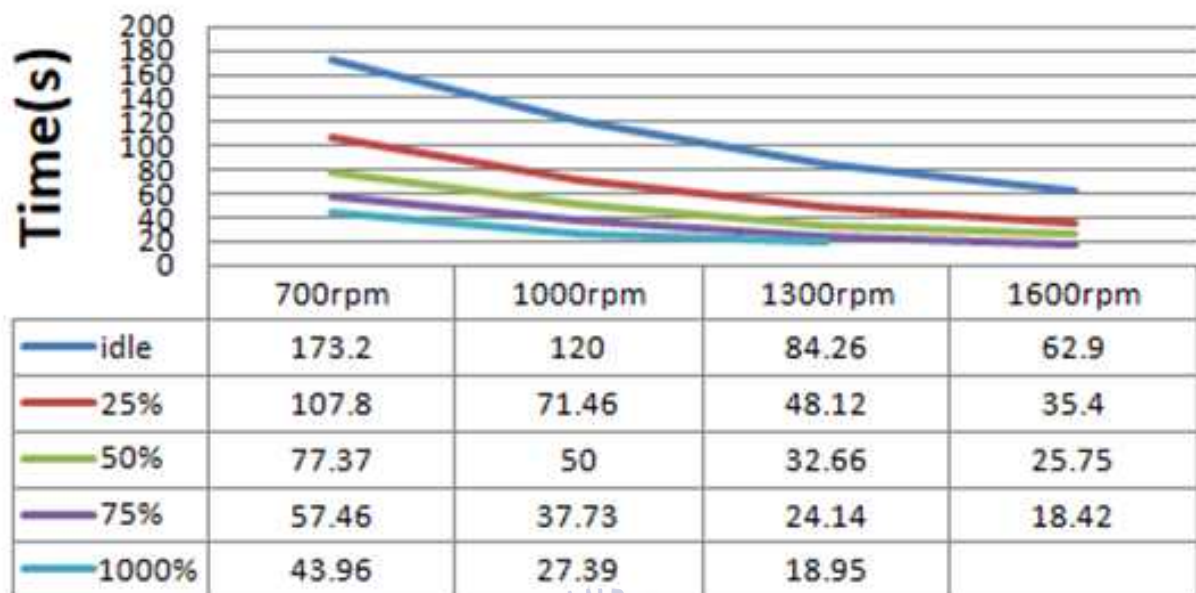


(d) at 60°

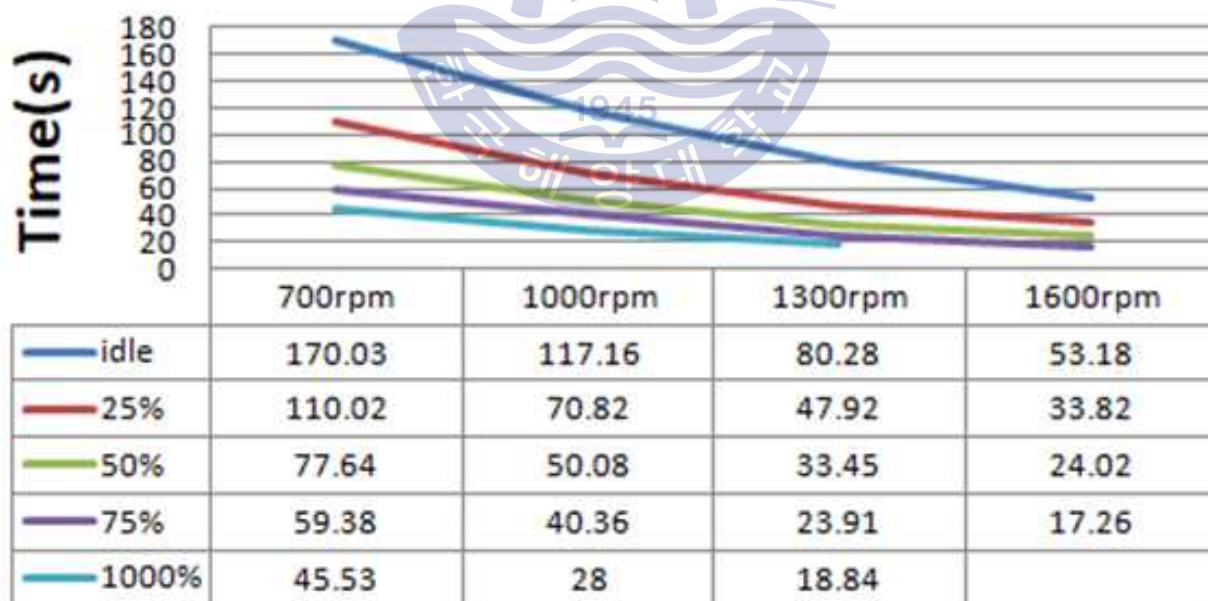


(e) at 75°

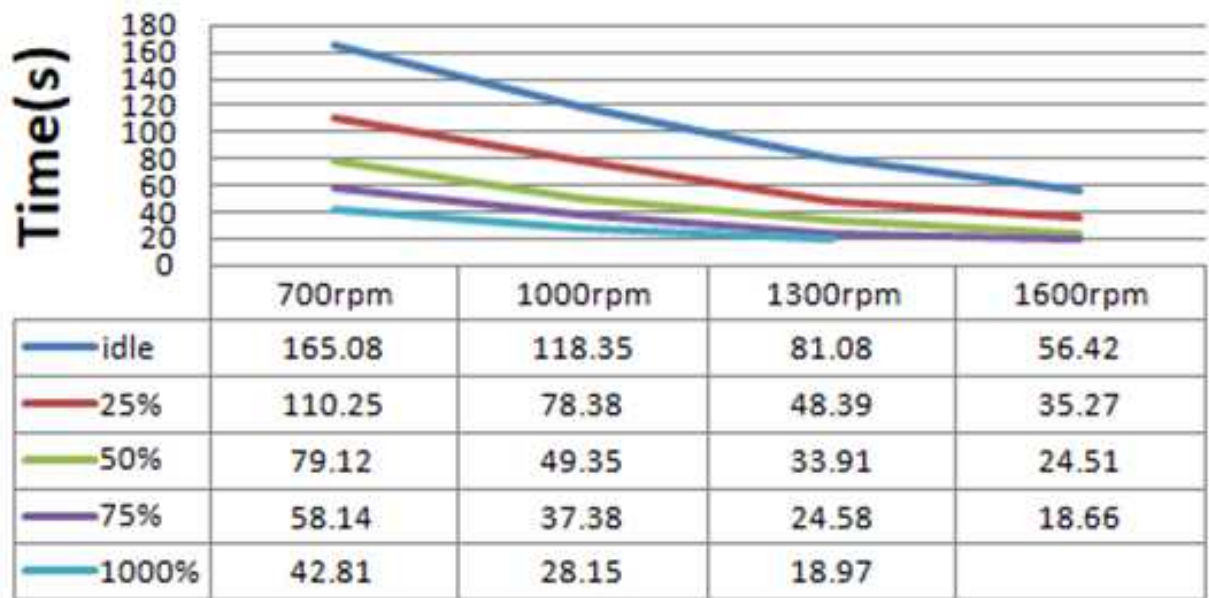
Fig. 3.11 Fuel consumption time at packing 0%



(a) at 0°

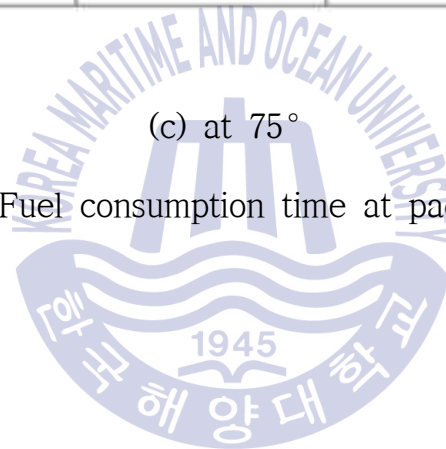


(b) at 45°



(c) at 75°

Fig. 3.12 Fuel consumption time at packing 100%



### 3.2.2 배기 온도

Fig 3.13~3.17은 충진율 0%에서 가이드 각도( $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$ )와 엔진속도 (700RPM, 1000RPM, 1300RPM, 1600RPM), 엔진부하 Idle, 25%, 50%, 75%, 100% (1600RPM에선 제외)일 때 P1,P2,P3의 배기가스 온도변화를 나타낸다. 열교환기를 설치하여 배기가스 온도차에 의한 스크러버 효율저감을 막고자 하였다.

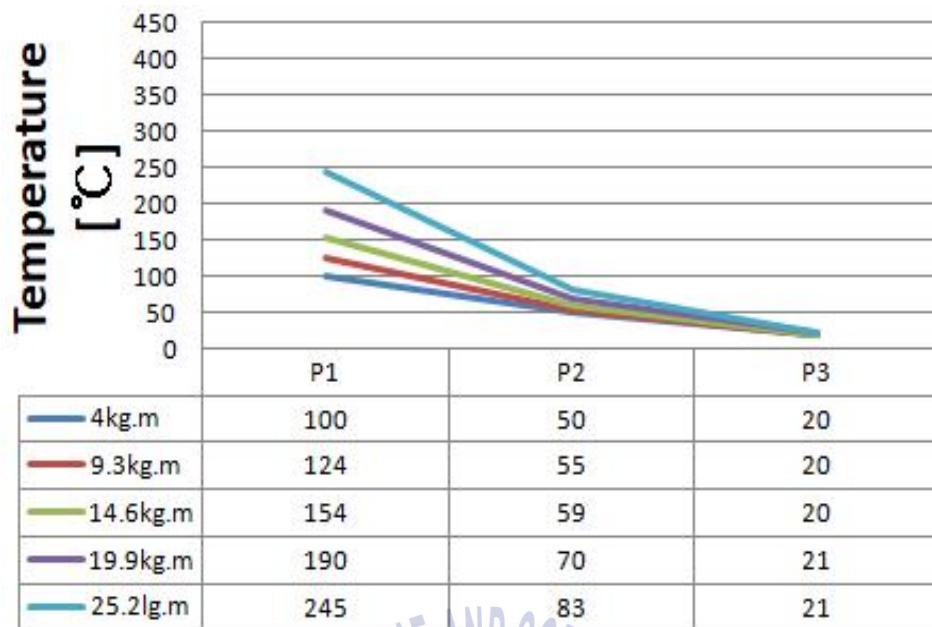
엔진 속도가 700RPM과 1000RPM구간에서 엔진 부하와 상관없이 P2에서의 배기가스 온도는 크게 높아지지 않았다. 엔진속도가 상승 할수록(1300RPM, 1600RPM) P2에서의 배기가스 온도는 700RPM과 1000RPM과 비교할 경우 높은 온도의 배기가스를 가지는 것으로 나타났다.

Fig. 3.18~3.20은 충진율 100%에서 가이드 각도  $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  와 엔진부하 Idle, 25%, 50%, 75%, 100%(1600RPM에선 100%제외)일 때 P1,P2,P3의 배기가스 온도변화를 나타낸다.

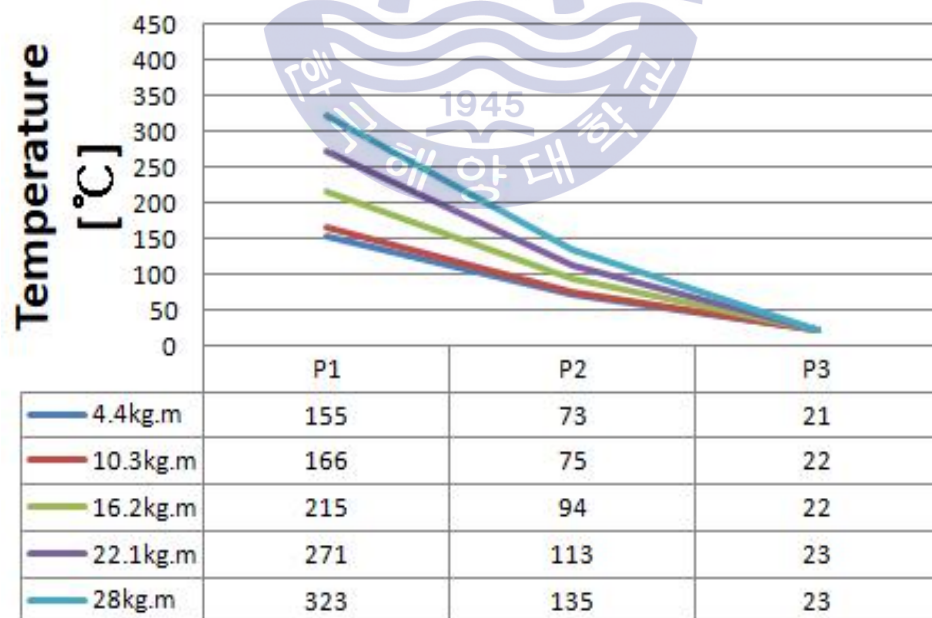
앞선 충진율 0%에서의 온도변화와 같은 경향을 나타냈으며 같은 각도를 비교해보았을 때 온도의 차이는 없었다.

또한 엔진속도로 비교해보았을 때 저 속도 구간이라 할 수 있는 700RPM과 1000RPM, 고 속도 구간이라 할 수 있는 1300RPM과 1600RPM에서 각각 비슷한 선형적인 그래프가 나타났다. 이로써 열교환기의 유량이 고 속도 구간에서 저 속도 구간보다 큰 영향을 끼치지 못한다는 것을 확인하였지만 어느 정도 배기가스의 온도를 낮추는 것으로 보아 열교환기를 설치함으로써 스크러버의 효율을 좀 더 증가 시킨다고 판단하였다.

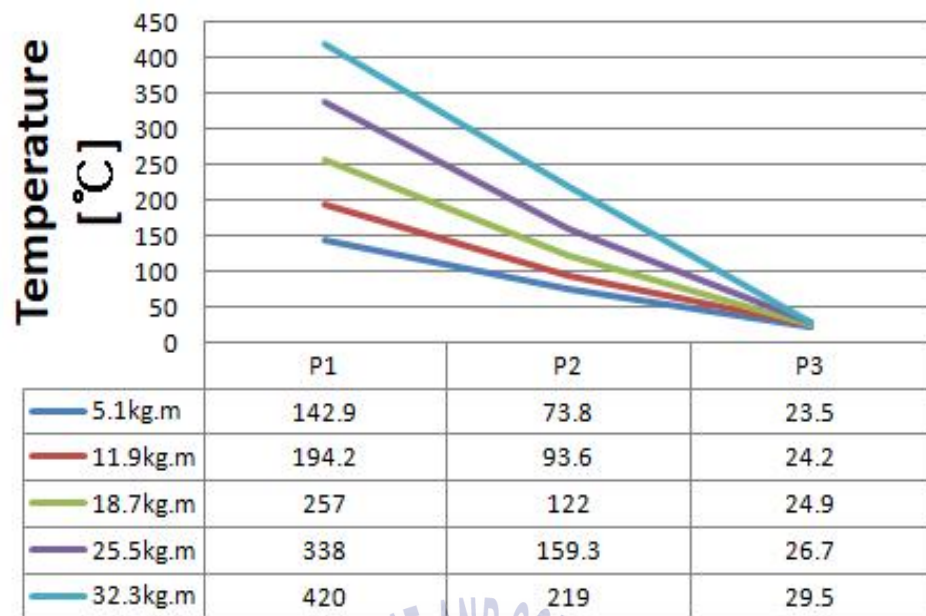




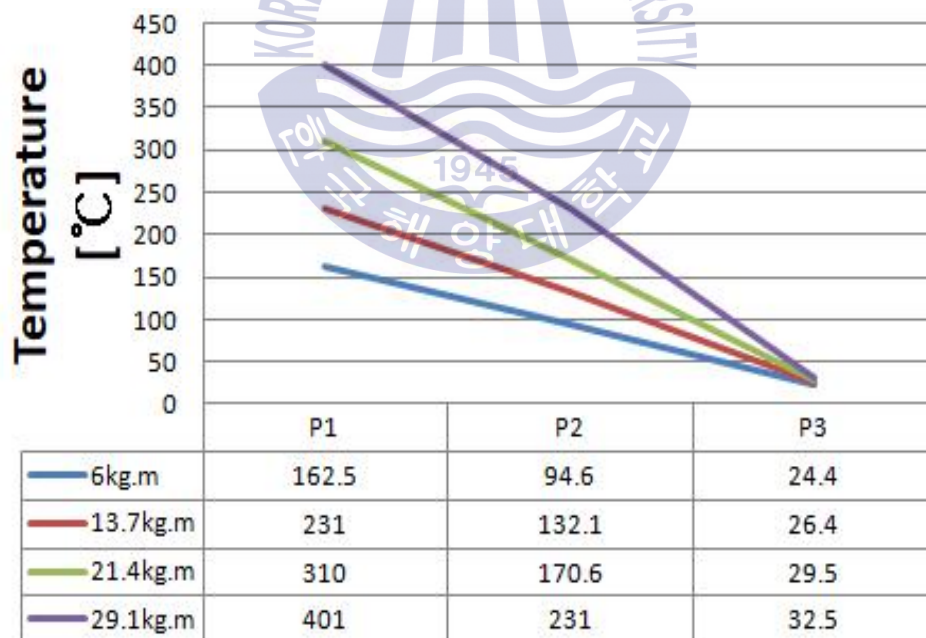
(a) at 700RPM



(b) at 1000RPM

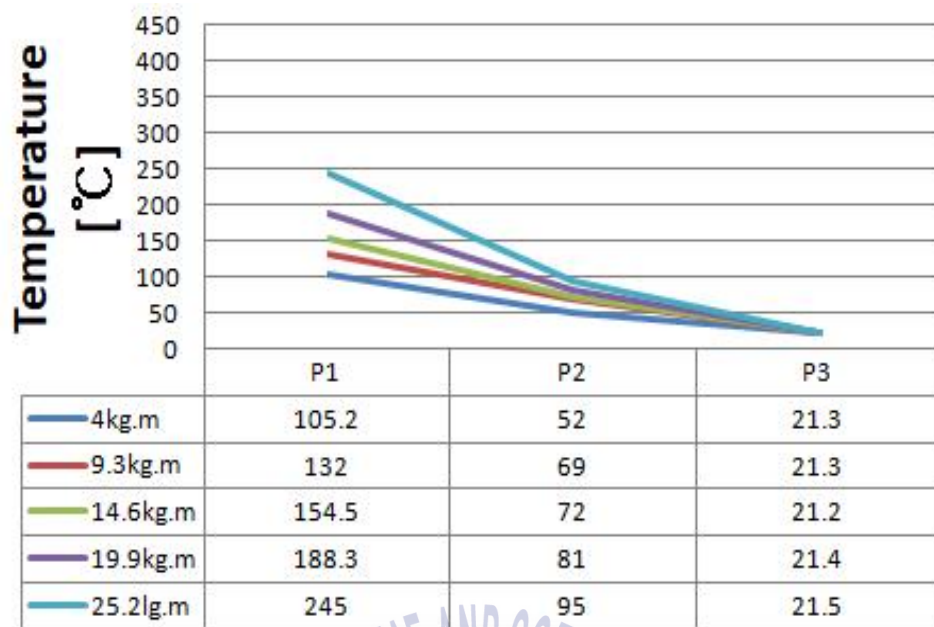


(c) at 1300RPM

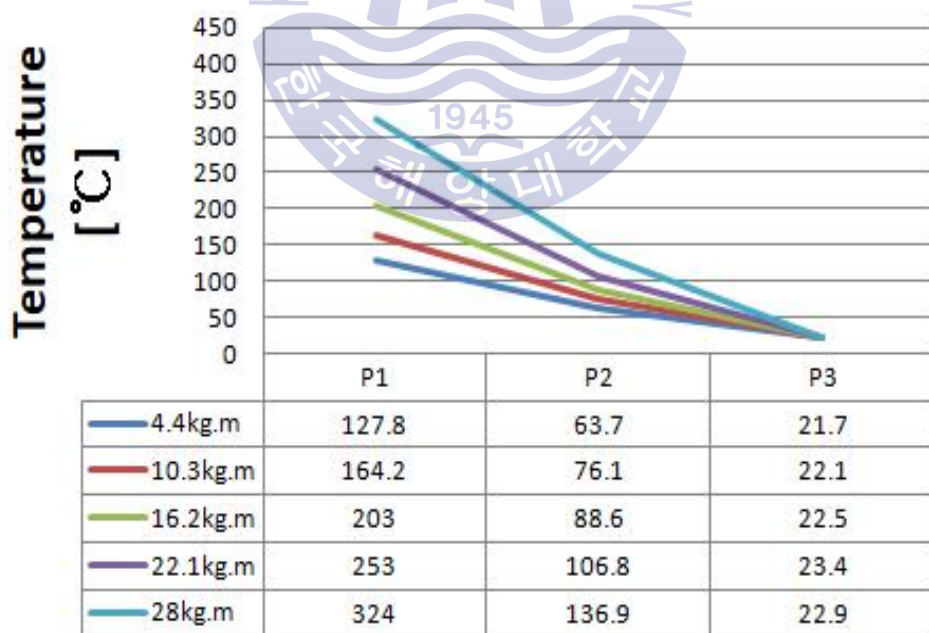


(d) at 1600RPM

Fig. 3.13 Exhaust gas temperature at no packing 0°

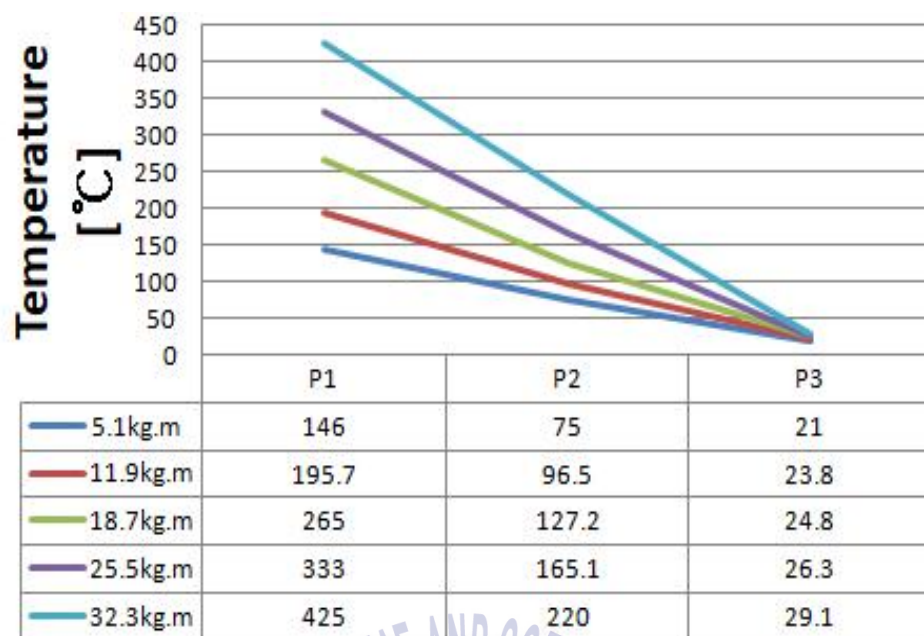


(a) at 700RPM

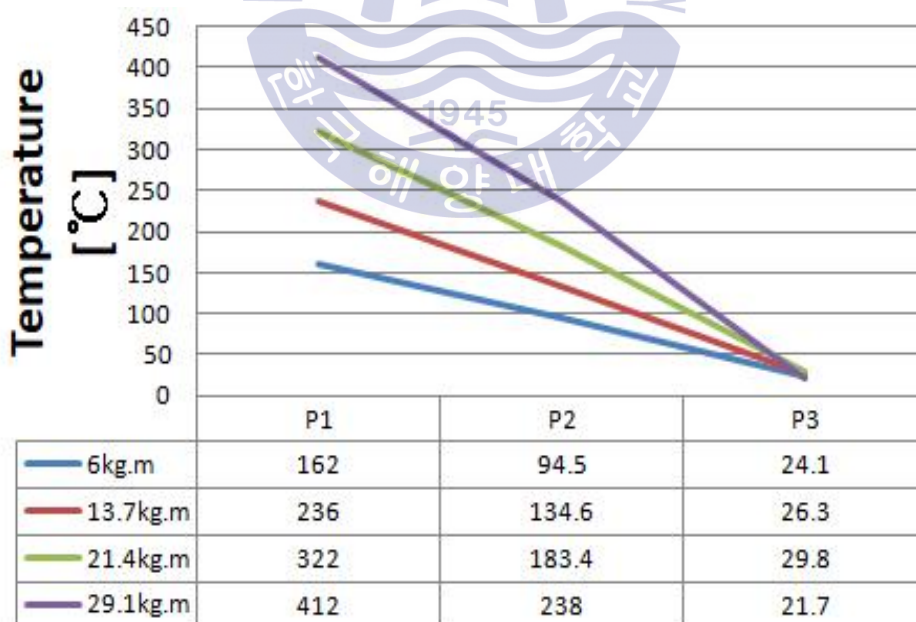


(b) at 1000RPM



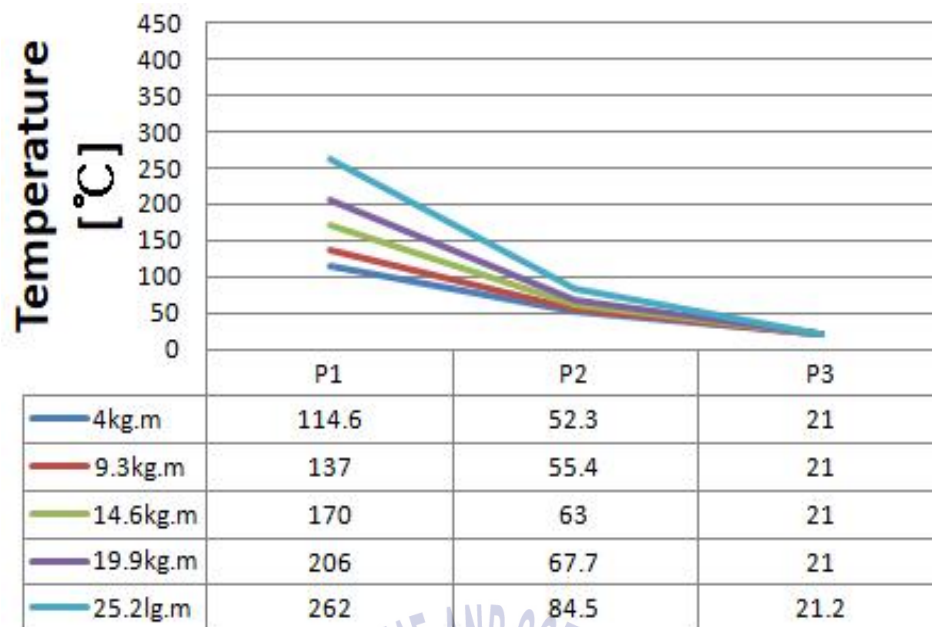


(c) at 1300RPM

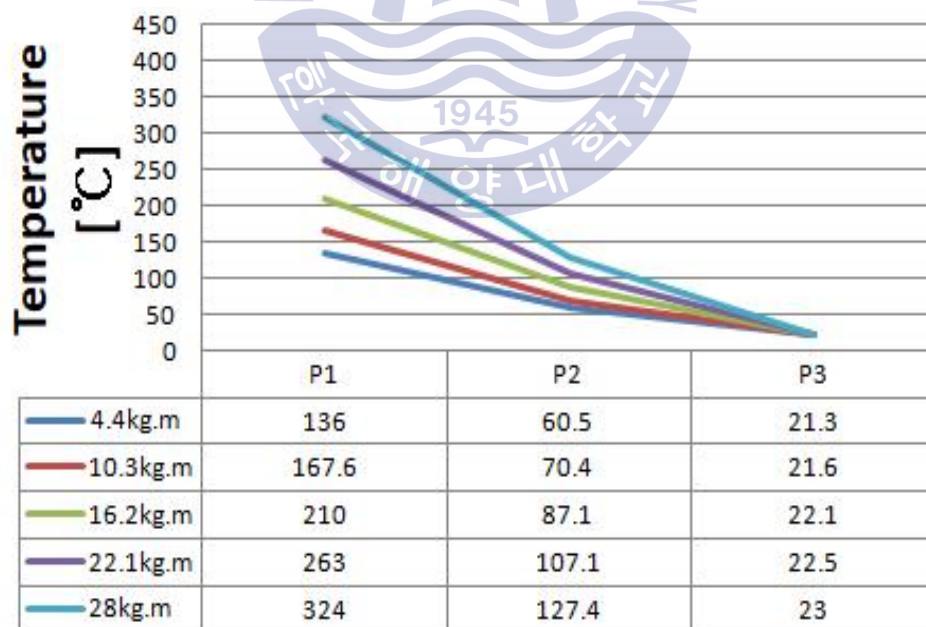


(d) at 1600RPM

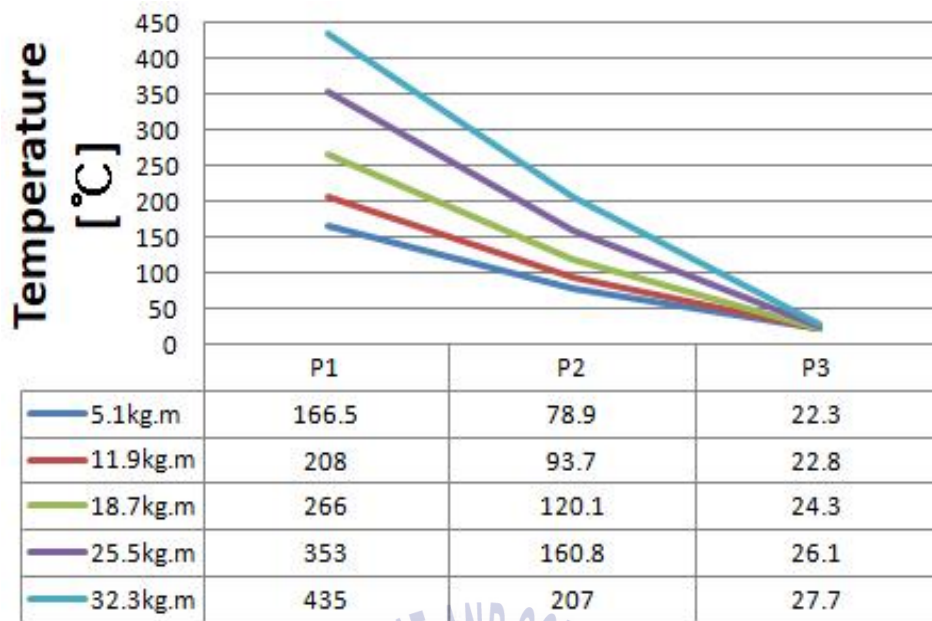
Fig. 3.14 Exhaust gas temperature at no packing 30°



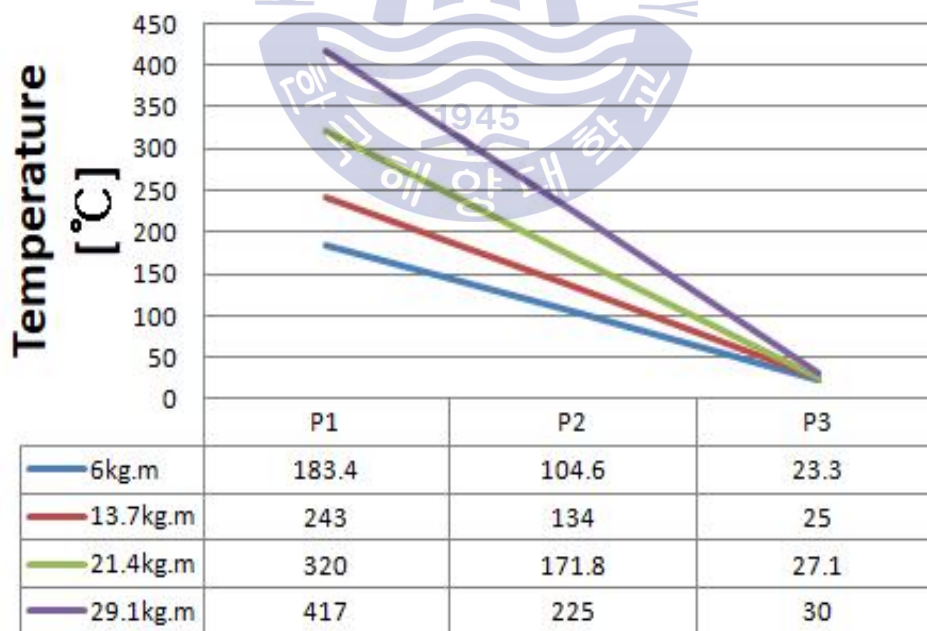
(a) at 700RPM



(b) at 1000RPM

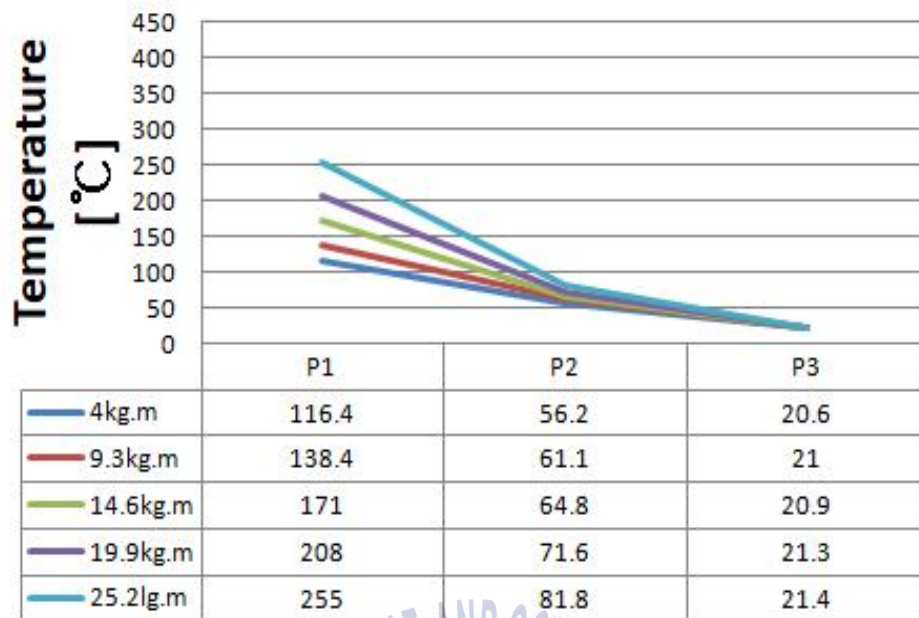


(c) at 1300RPM

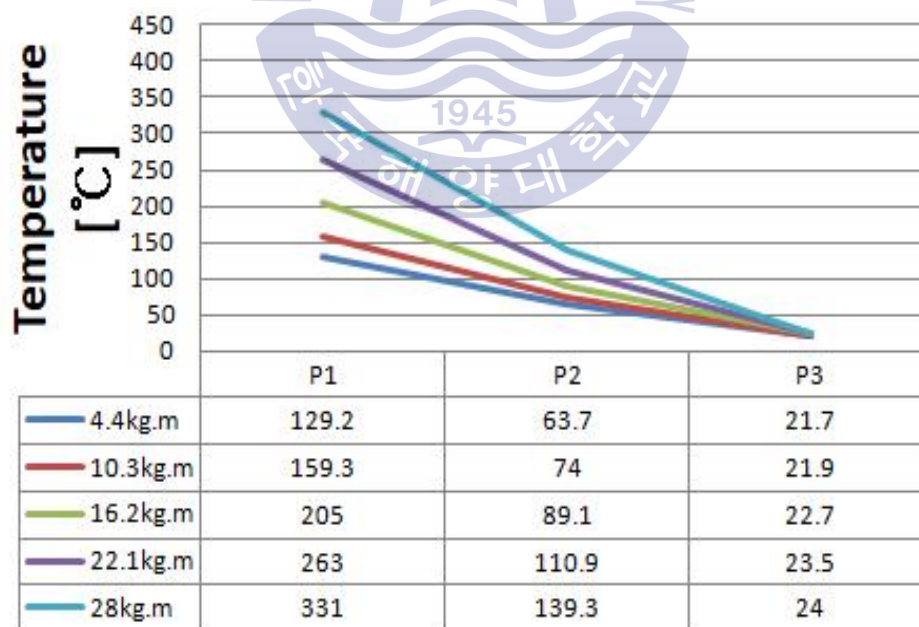


(d) at 1600RPM

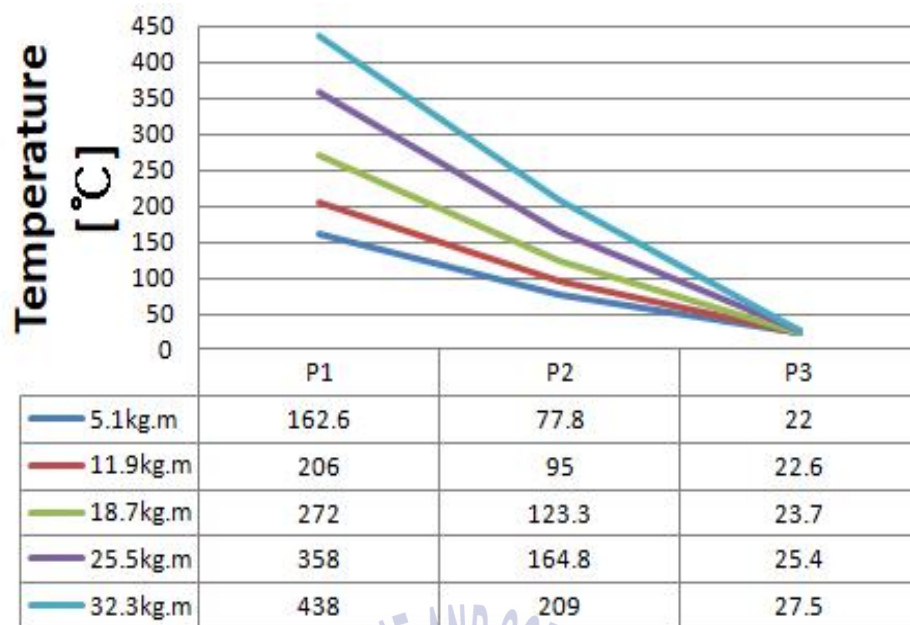
Fig. 3.15 Exhaust gas temperature at no packing 45°



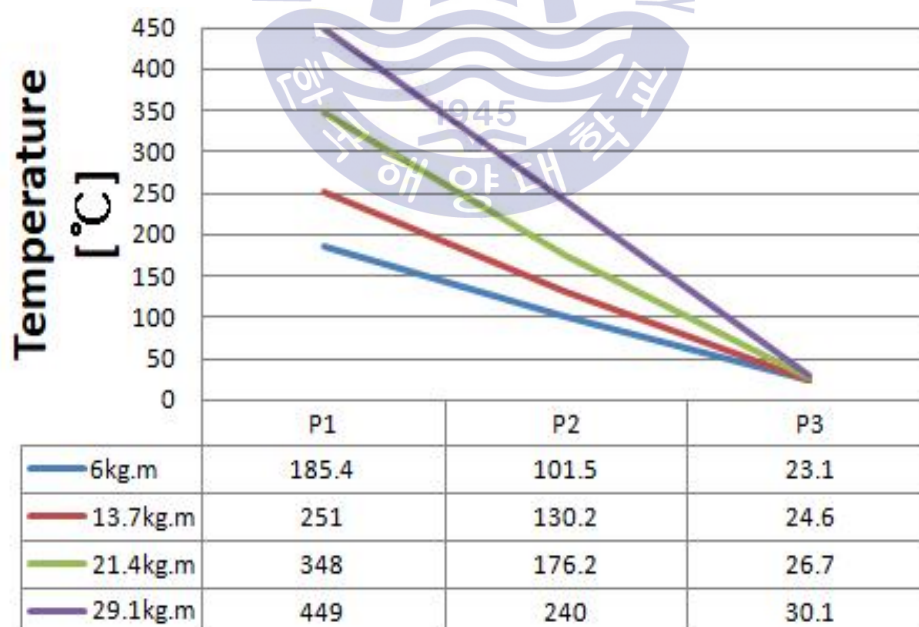
(a) at 700RPM



(b) at 1000RPM



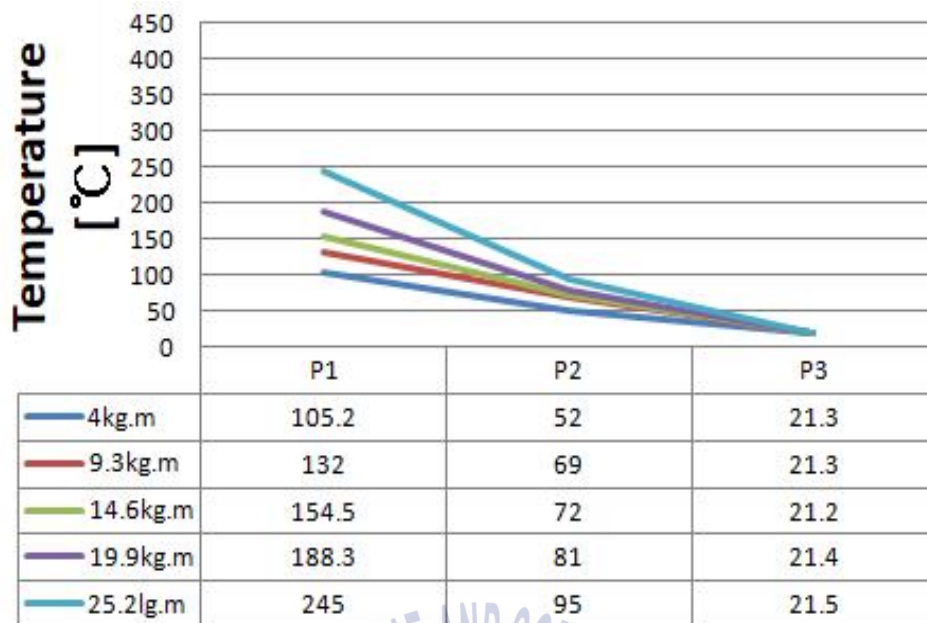
(c) at 1300RPM



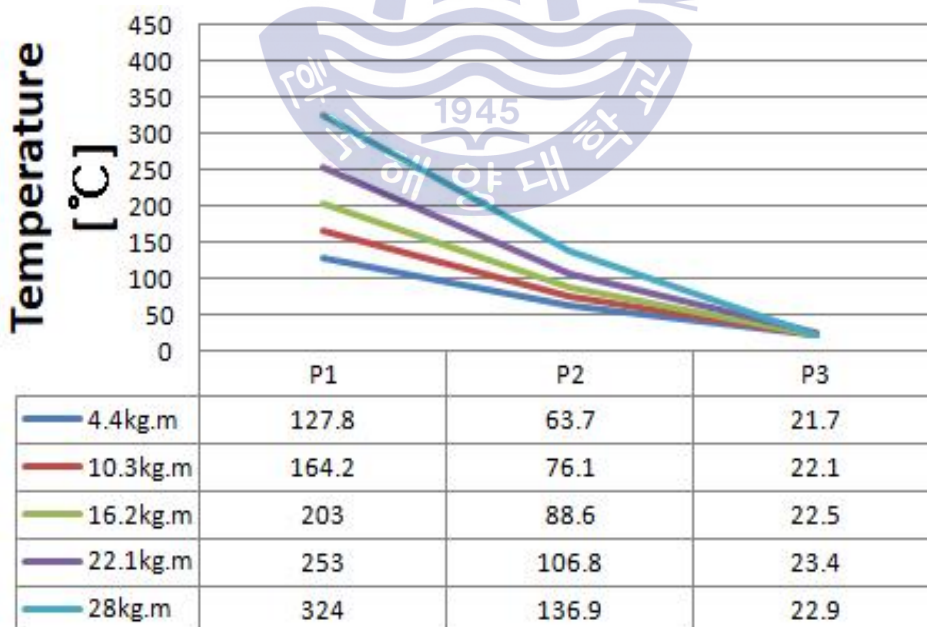
(d) at 1600RPM

Fig. 3.16 Exhaust gas temperature at no packing 60°



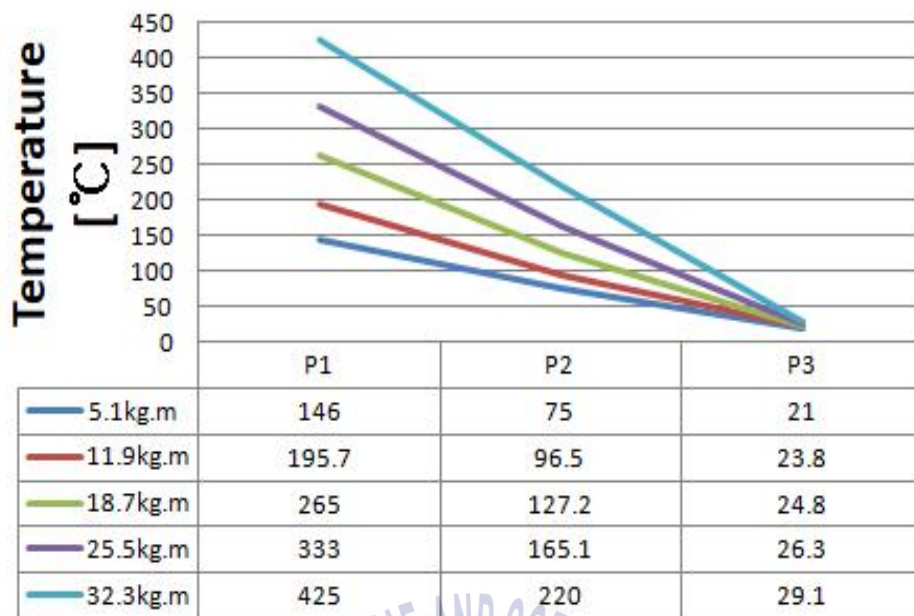


(a) at 700RPM

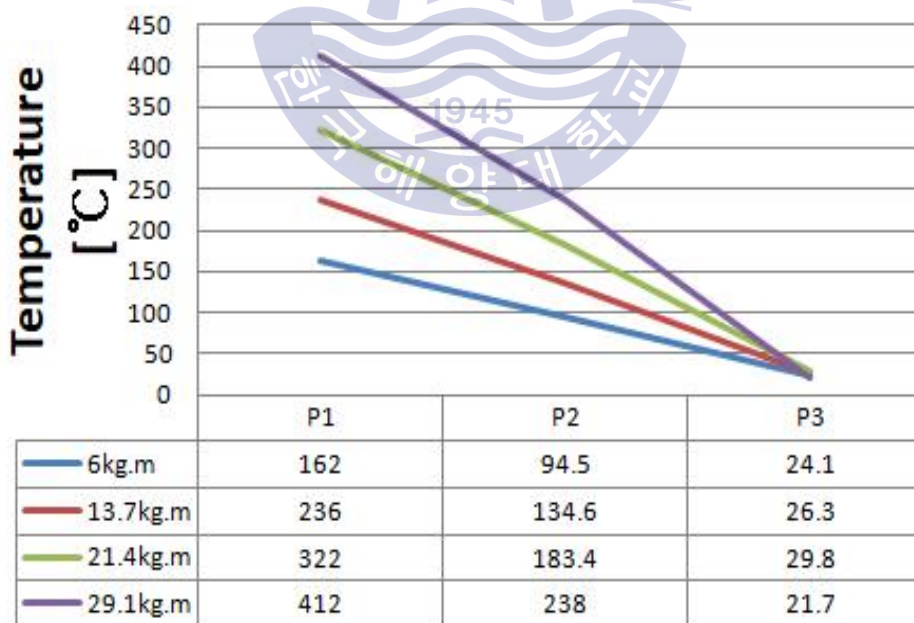


(b) at 1000RPM



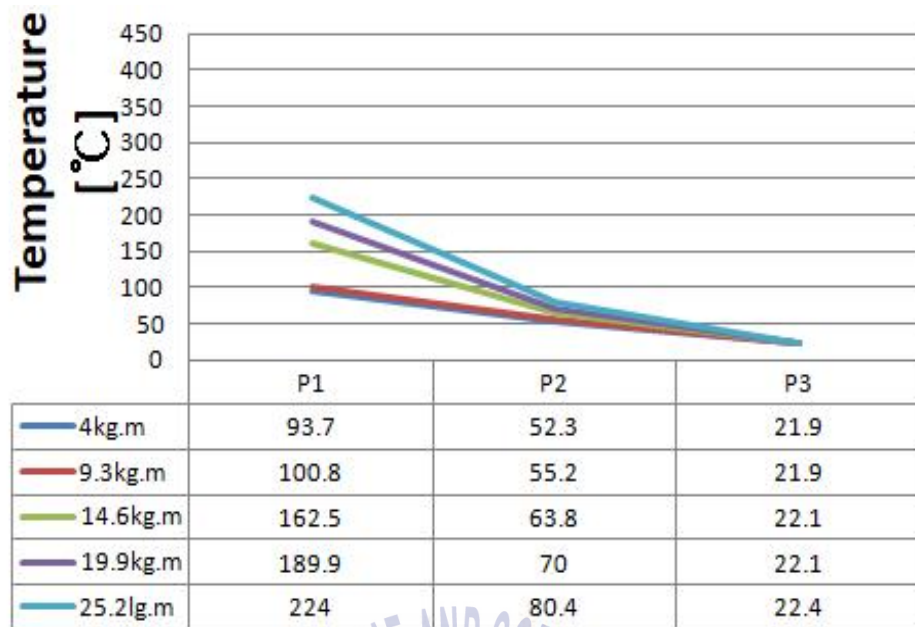


(c) at 1300RPM

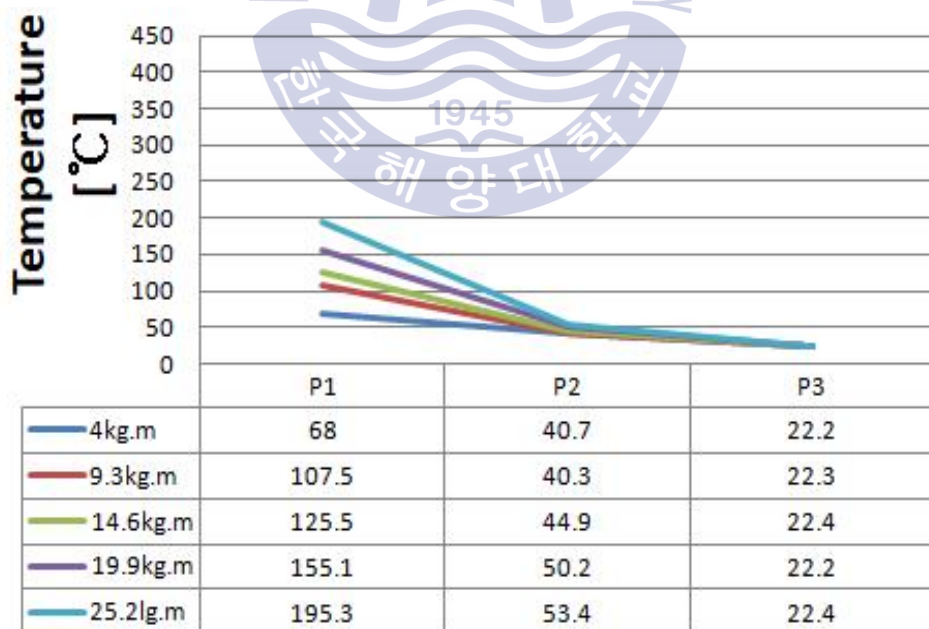


(d) at 1600RPM

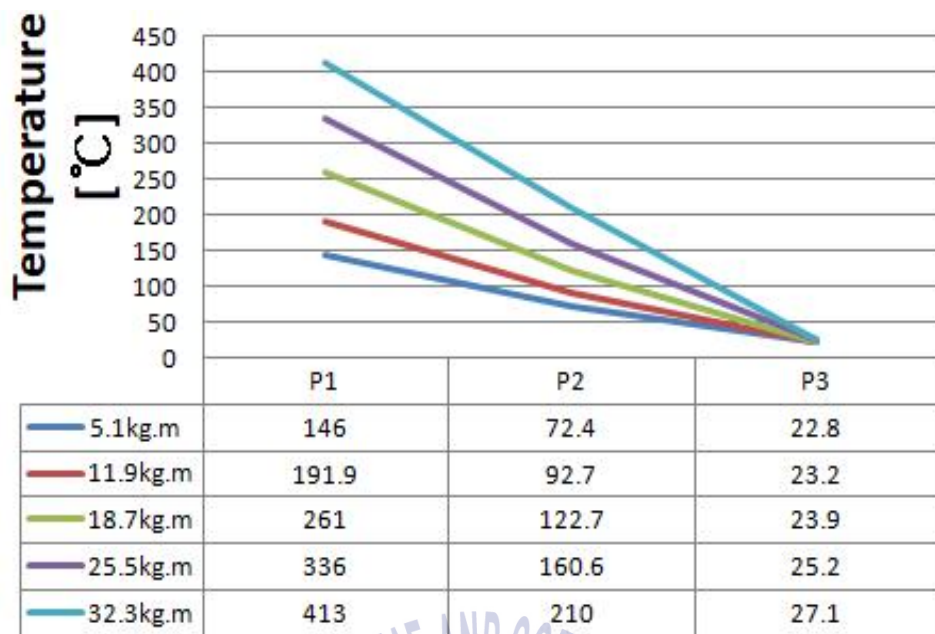
Fig. 3.17 Exhaust gas temperature at no packing 75°



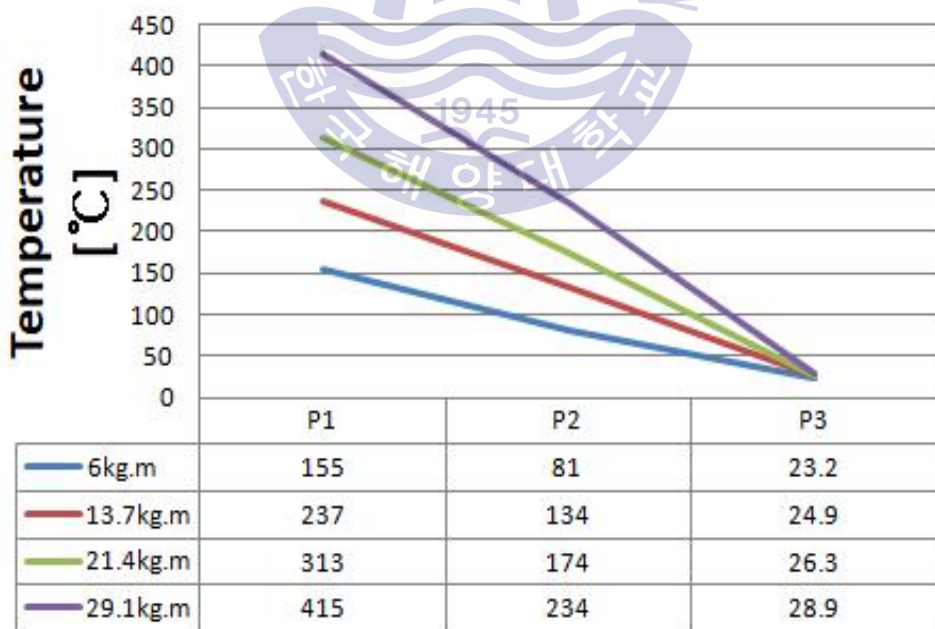
(a) at 700RPM



(b) at 1000RPM

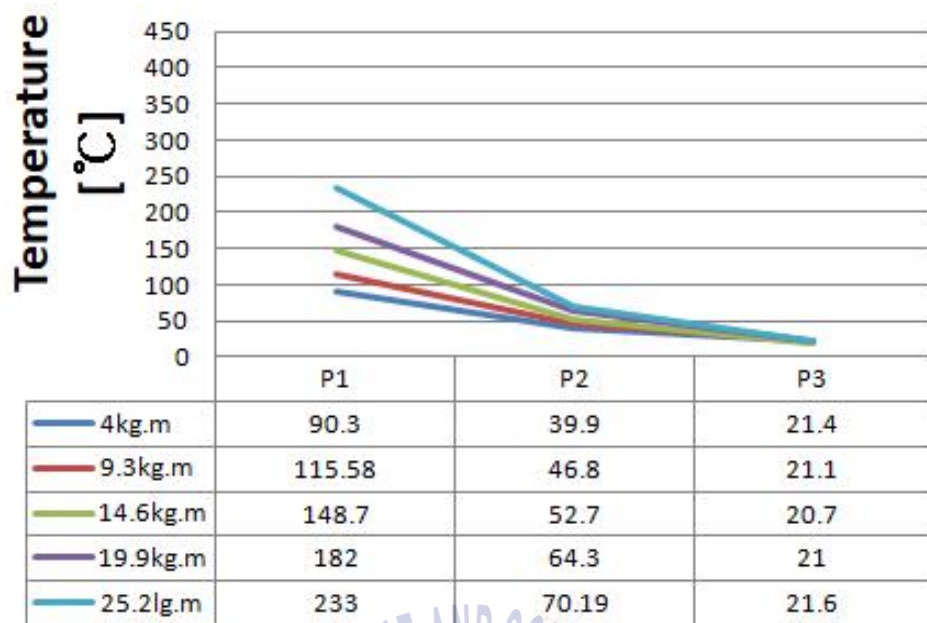


(c) at 1300RPM

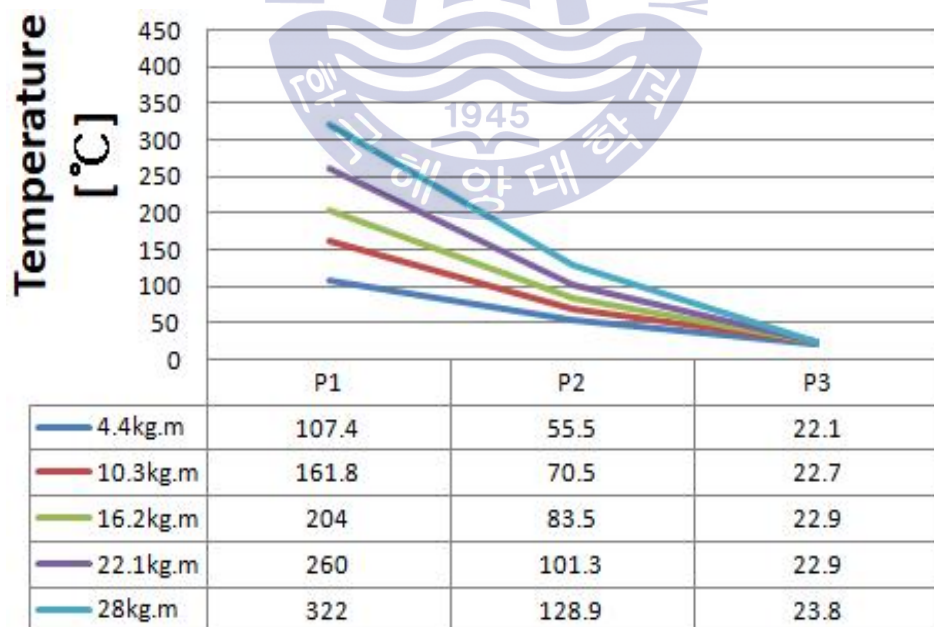


(d) at 1600RPM

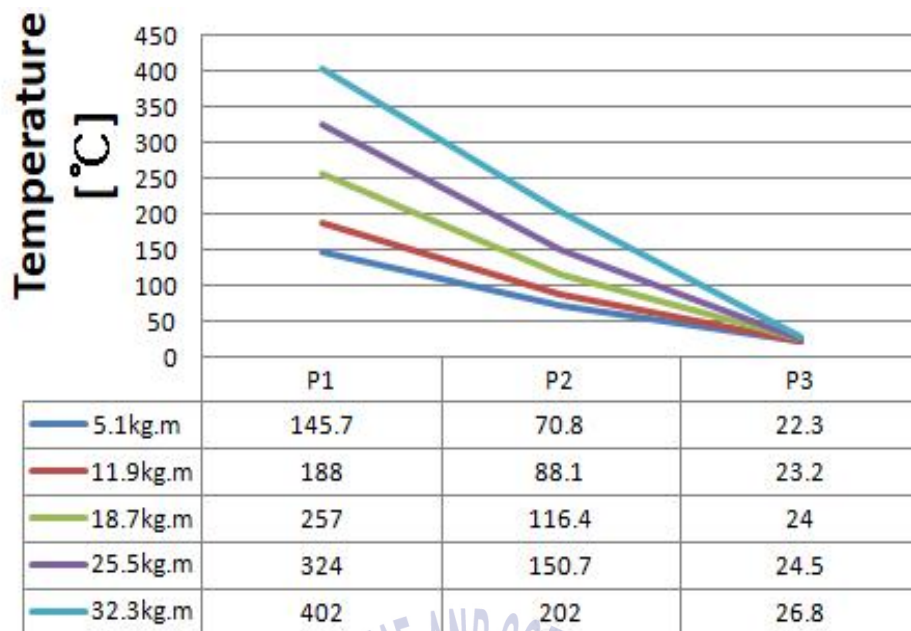
Fig. 3.18 Exhaust gas temperature at packing rate 100% 0°



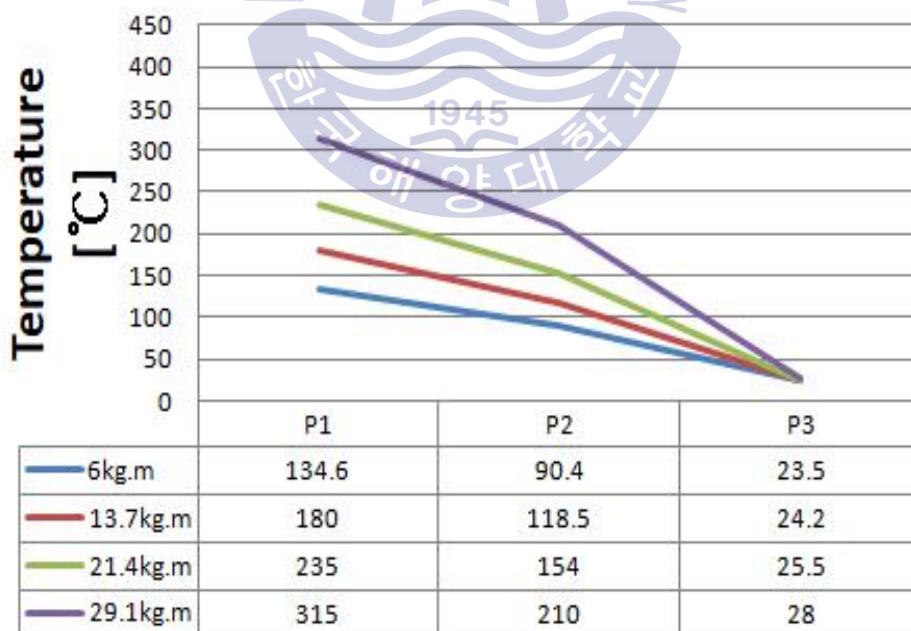
(a) at 700RPM



(b) at 1000RPM



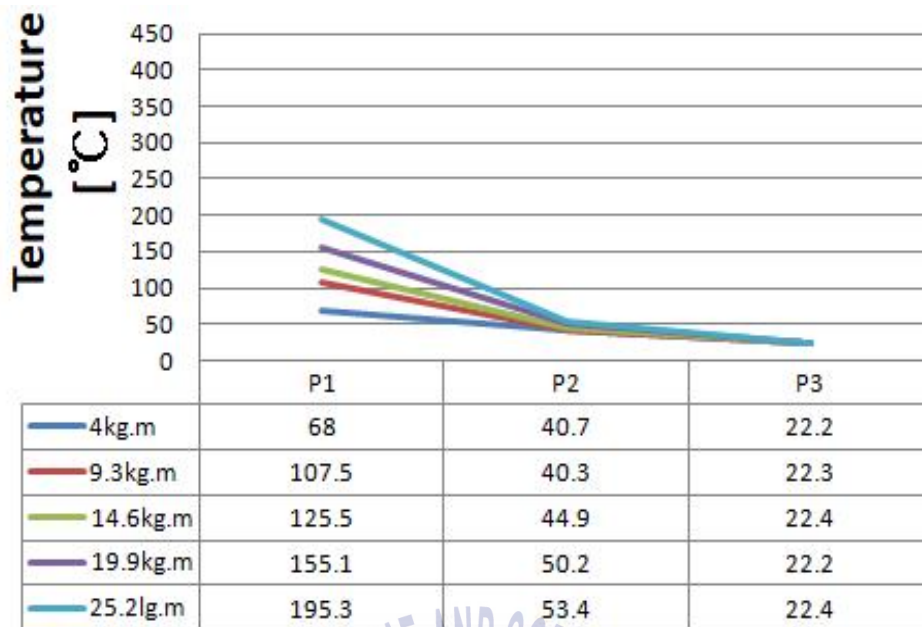
(c) at 1300RPM



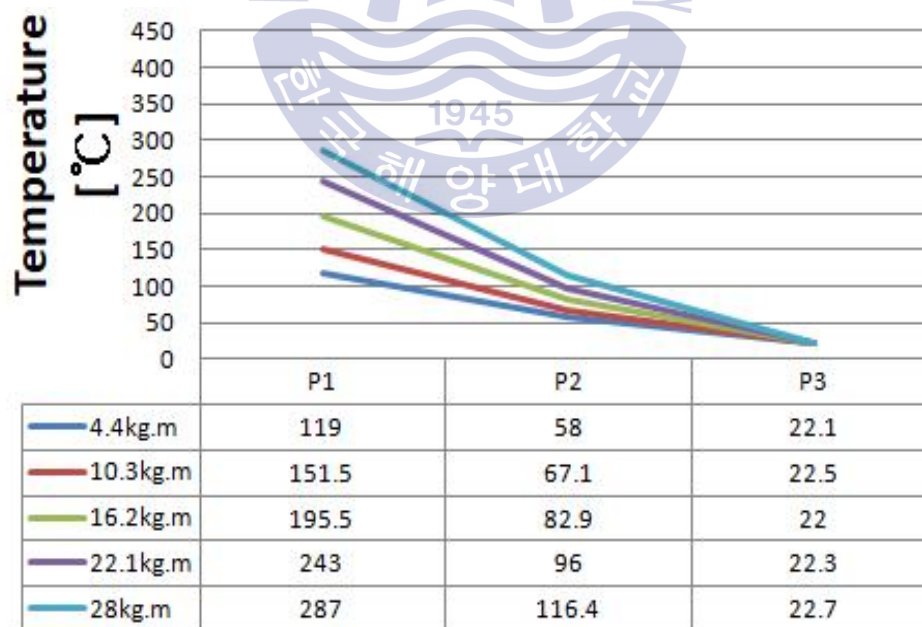
(d) at 1600RPM

Fig. 3.19 Exhaust gas temperature at packing rate 100% 45°



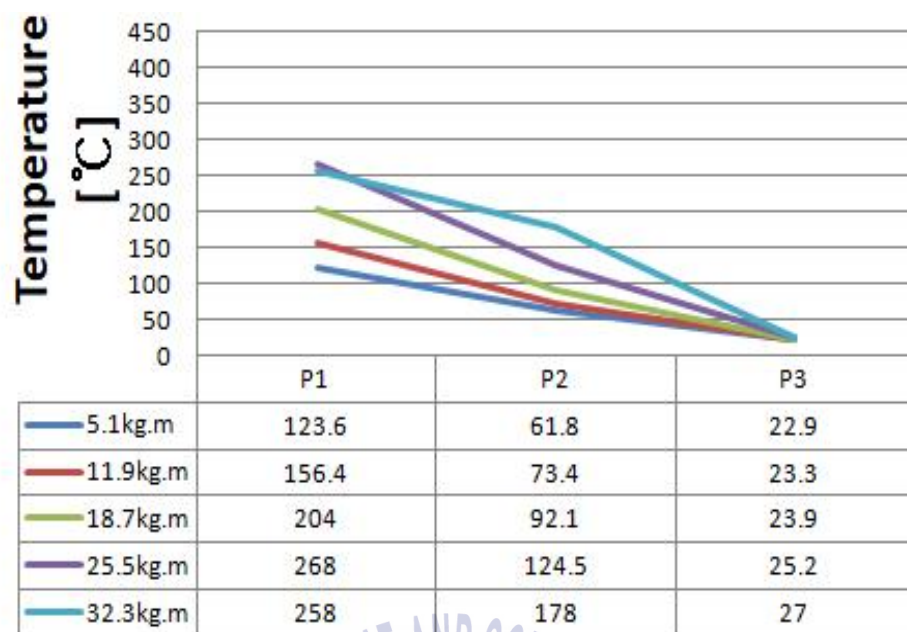


(a) at 700RPM

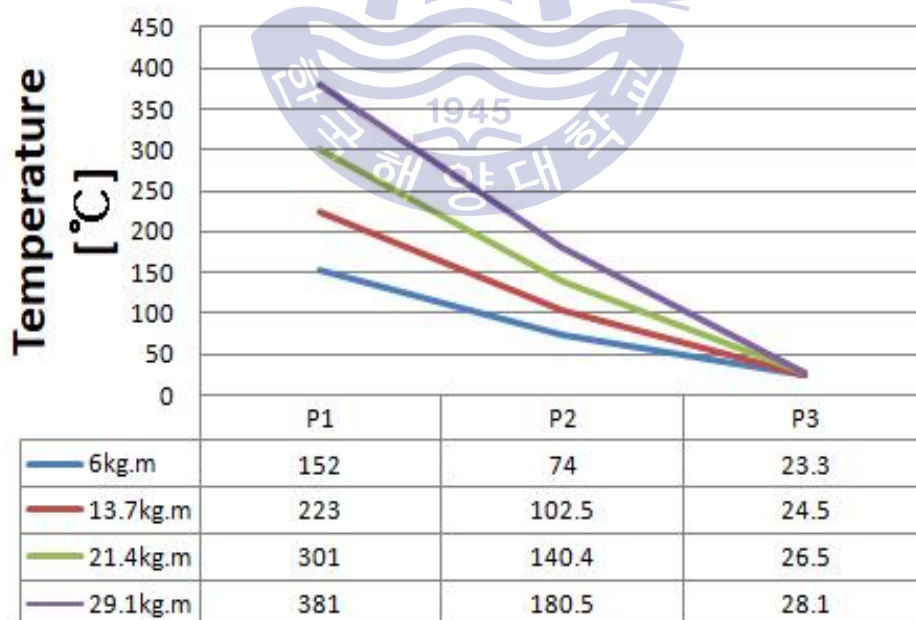


(b) at 1000RPM





(c) at 1300RPM



(d) at 1600RPM

Fig. 3.20 Exhaust gas temperature at packing rate 100% 75°

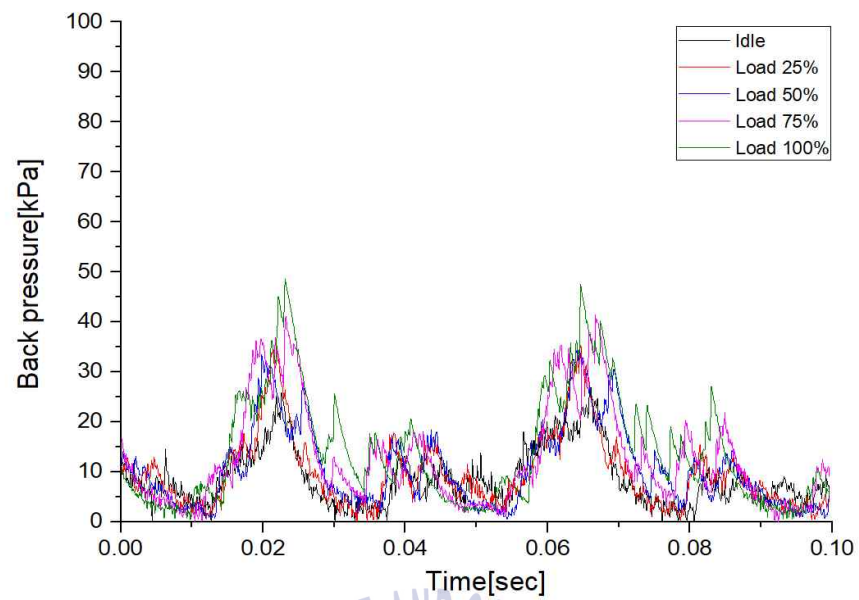
### 3.2.3 Back pressure

Back pressure를 측정하여 가이드 각도에 따라 엔진에 얼마나 큰 영향을 미치는가 파악하고자 하였고 Fig.3.21 ~ 3.25는 충진율 0%에서 가이드 각도  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  와 엔진부하 Idle, 25%, 50%, 75%, 100%(1600RPM에선 100%제외)일 때 매니폴드 직후에서의 Back pressure를 나타낸다.

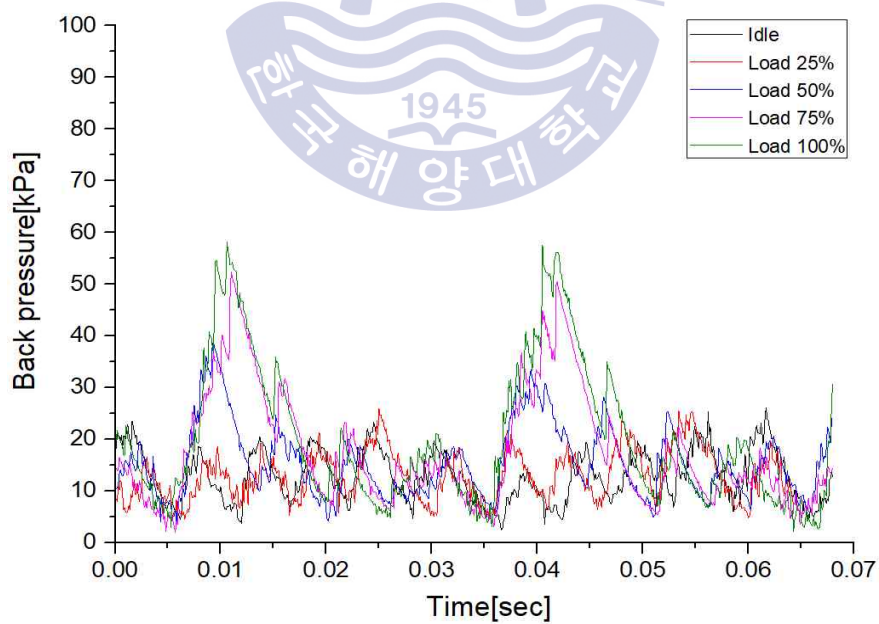
모든 각도 700RPM 구간에서는 일정한 파형의 Back pressure곡선이 나왔으며 각도가 커질수록 최대압력의 값은 커진다. 1000RPM과 1300RPM에서는 700RPM보단 큰 값을 가지지만 둘 사이의 압력의 차는 크게 존재하지 않았다. 1600RPM에서의 압력값은 앞선 구간에 비해 크게 증가하였으며 80~100KPa의 값을 가진다.

Fig.3.26 ~ 3.28은 충진율 100%에서 가이드 각도  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  와 엔진부하 Idle, 25%, 50%, 75%, 100%(1600RPM에선 100%제외)일 때 매니폴드 직후에서의 Back pressure를 나타낸다.

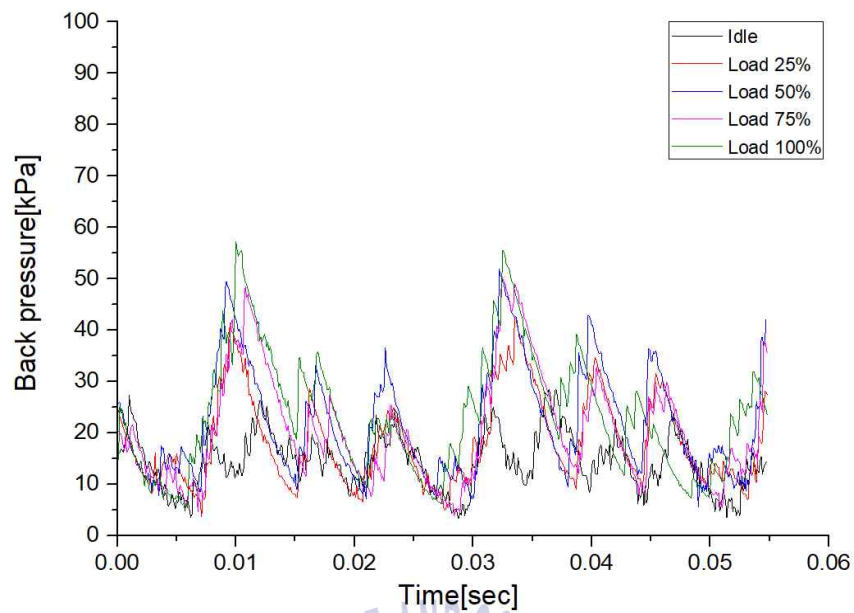
충진율 100%의 경우에도 모든 각도 700RPM 구간에서는 일정한 파형의 Back pressure곡선이 나왔으며 각도가 커질수록 최대압력의 값은 커진다. 1000RPM과 1300RPM에서는 700RPM보단 큰 값을 가지지만 둘 사이의 압력의 차는 크게 존재하지 않았다. 1600RPM에서의 압력값은 앞선 구간에 비해 크게 증가한다.



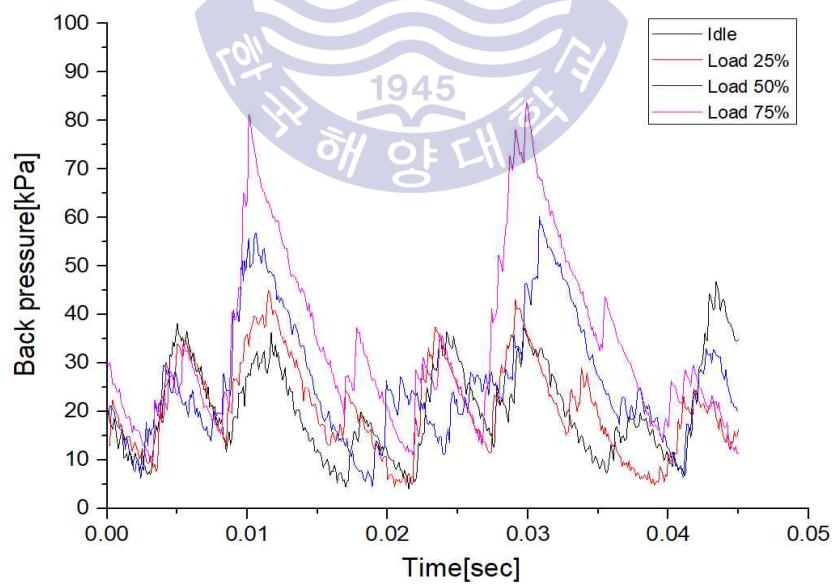
(a) at 700RPM



(b) at 1000RPM

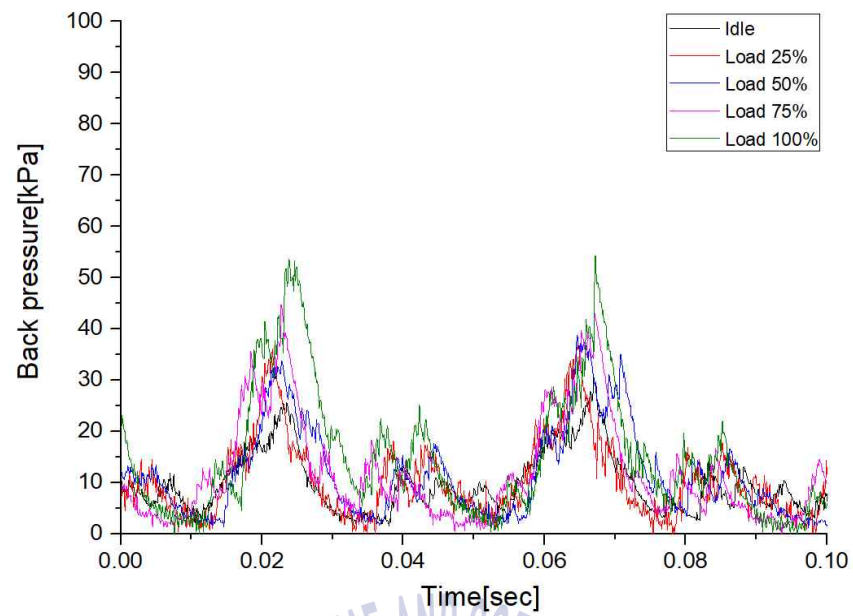


(c) at 1300RPM

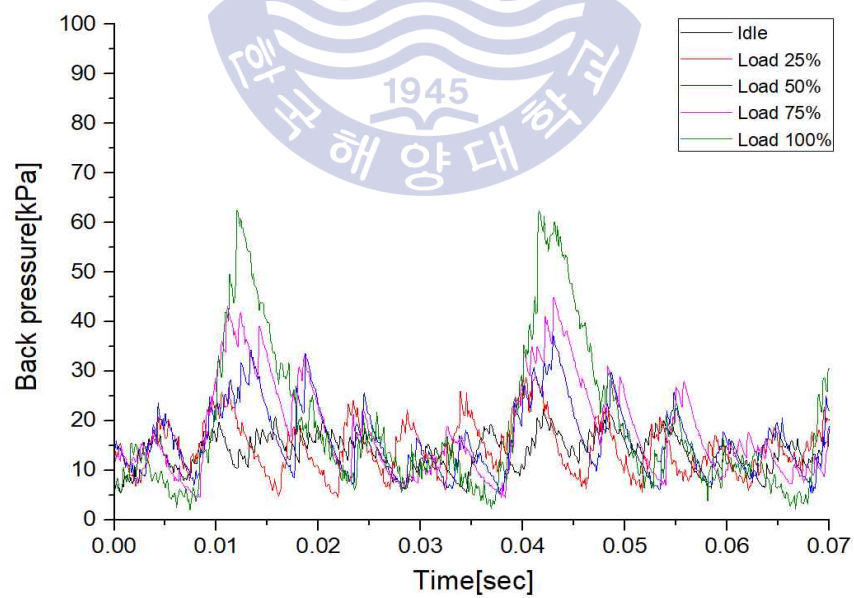


(d) at 1600RPM

Fig. 3.21 Back pressure at no packing 0°

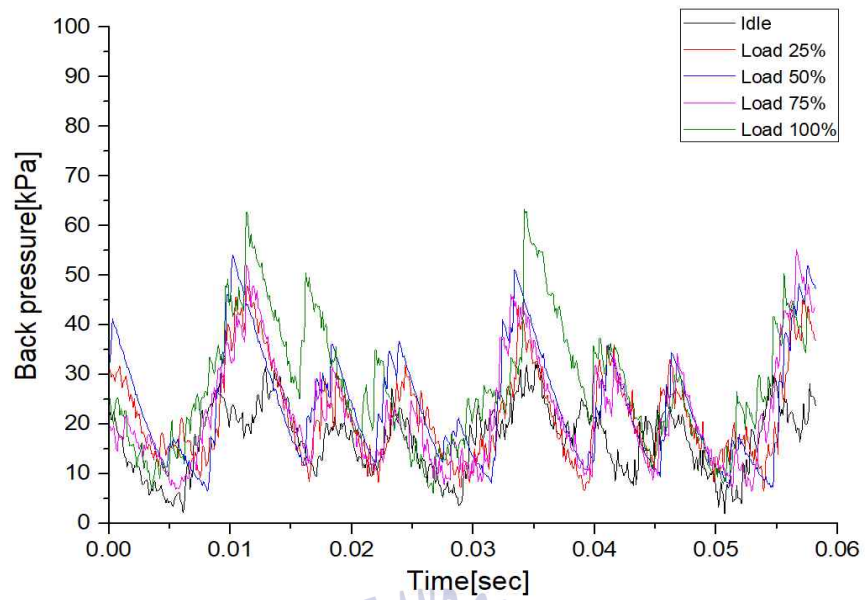


(a) at 700RPM

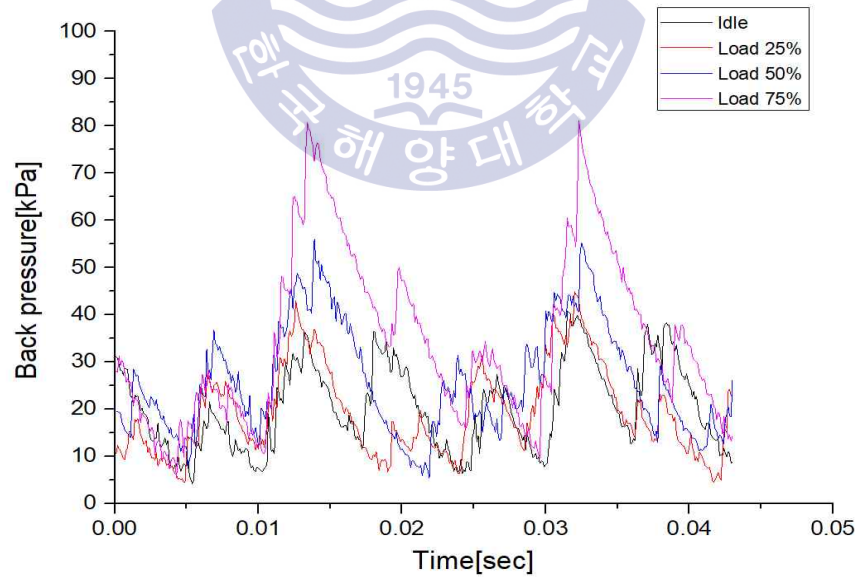


(b) at 1000RPM



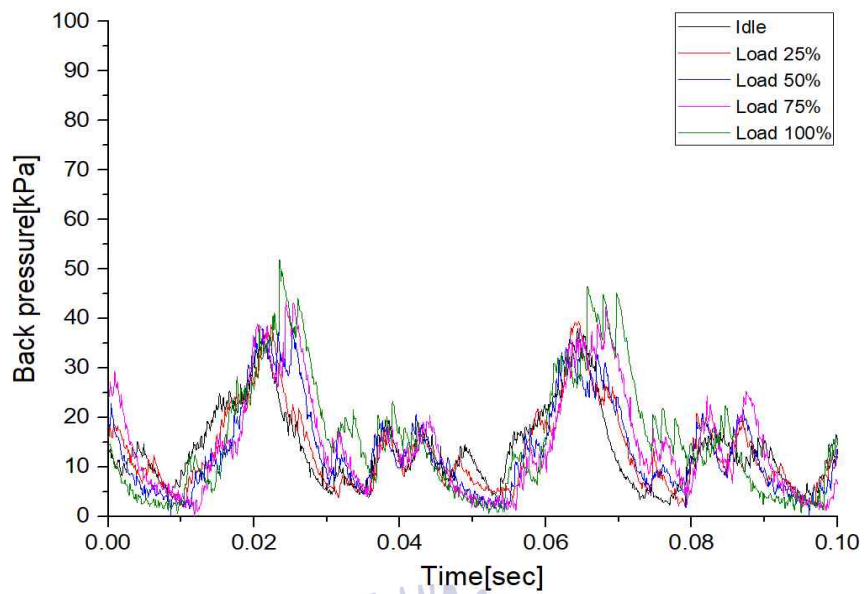


(c) at 1300RPM

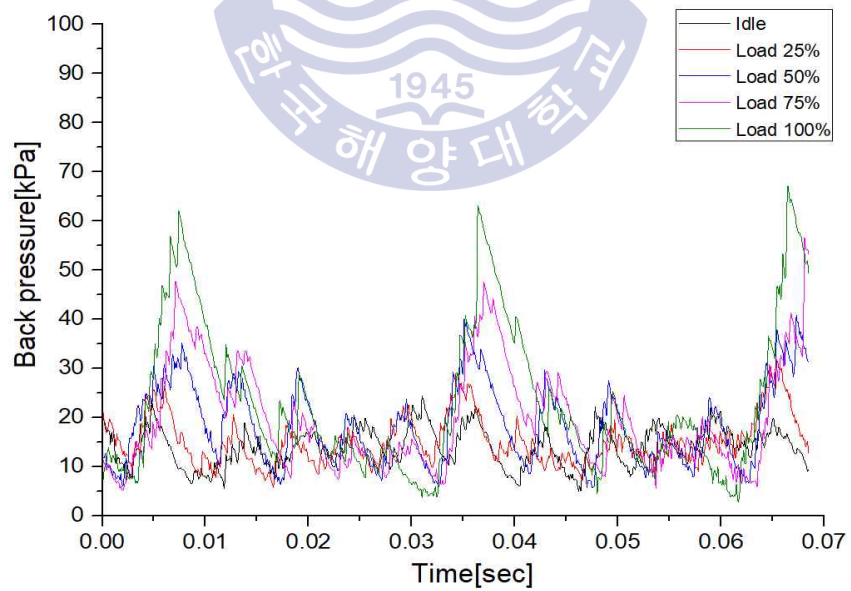


(d) at 1600RPM

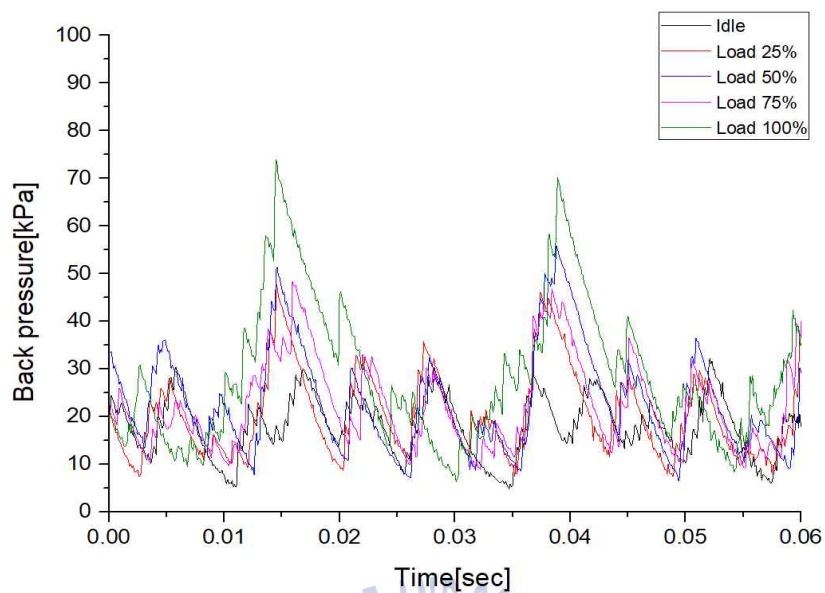
Fig. 3.22 Back pressure at no packing 30°



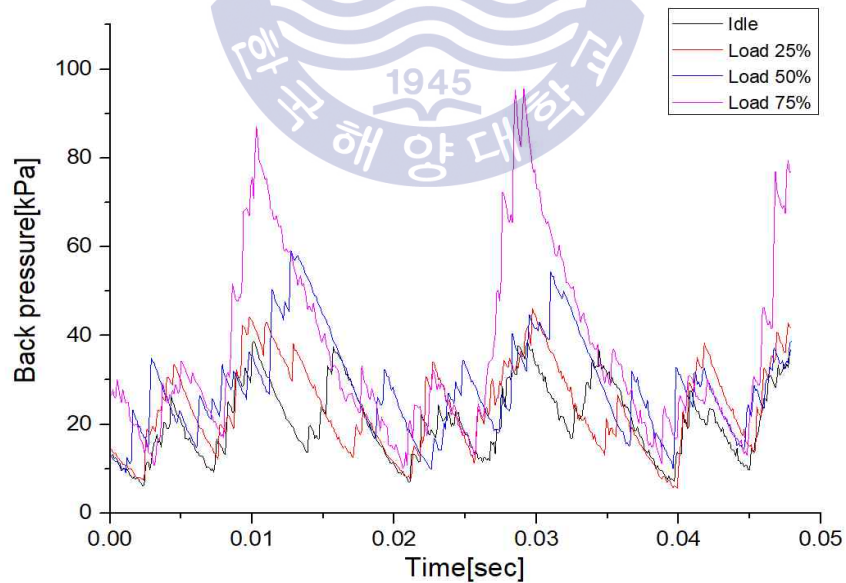
(a) at 700RPM



(b) at 1000RPM

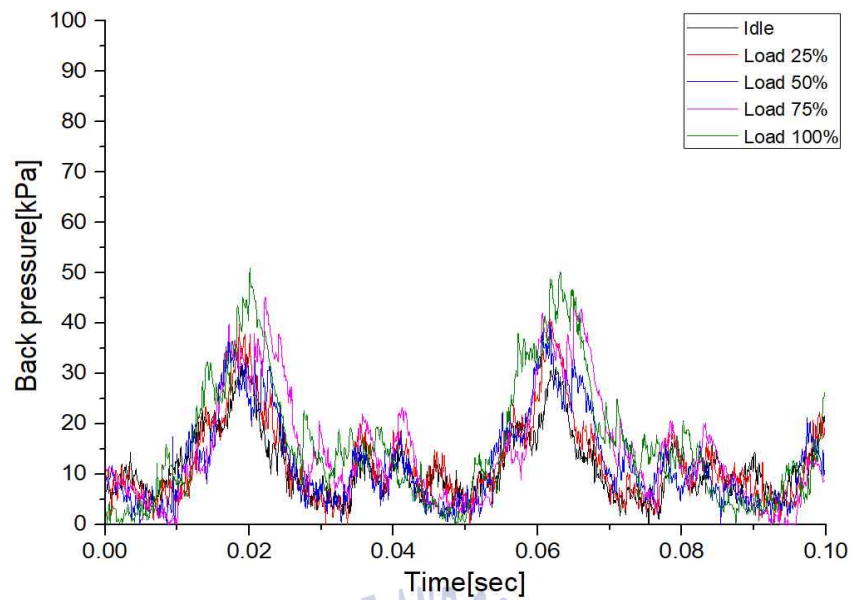


(c) at 1300RPM

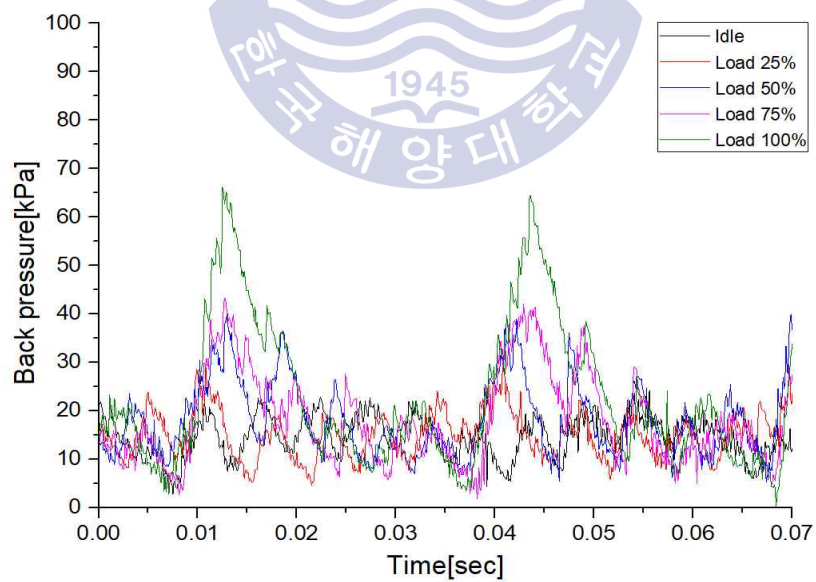


(d) at 1600RPM

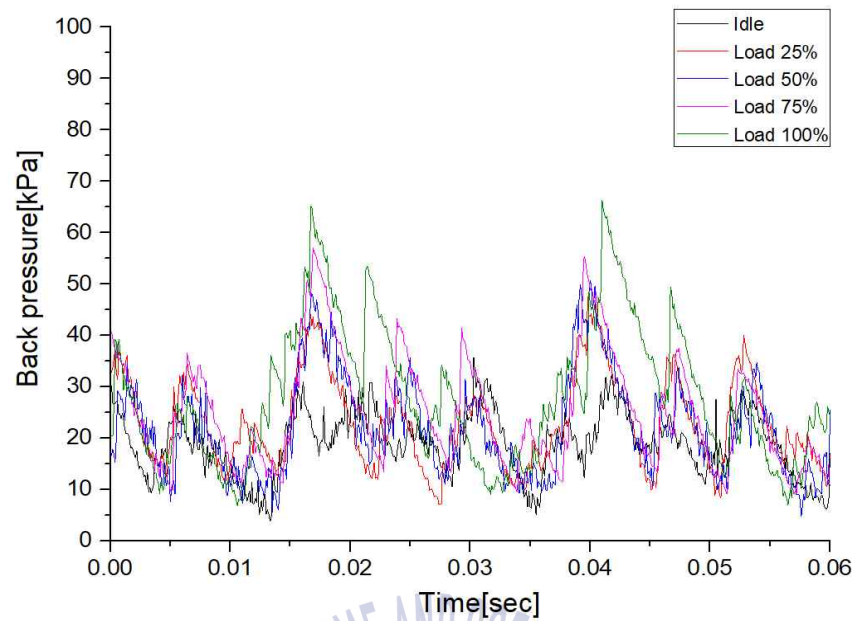
Fig. 3.23 Back pressure at no packing 45°



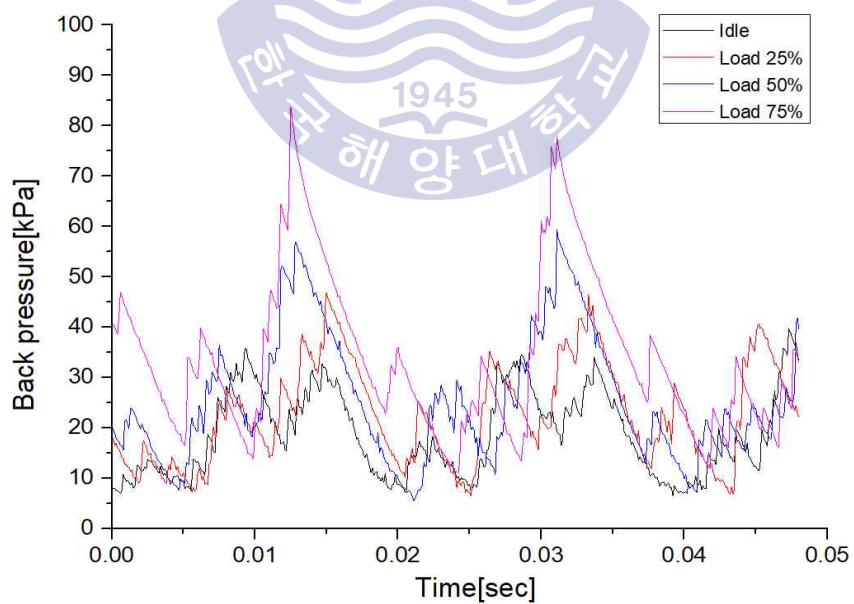
(a) at 700RPM



(b) at 1000RPM



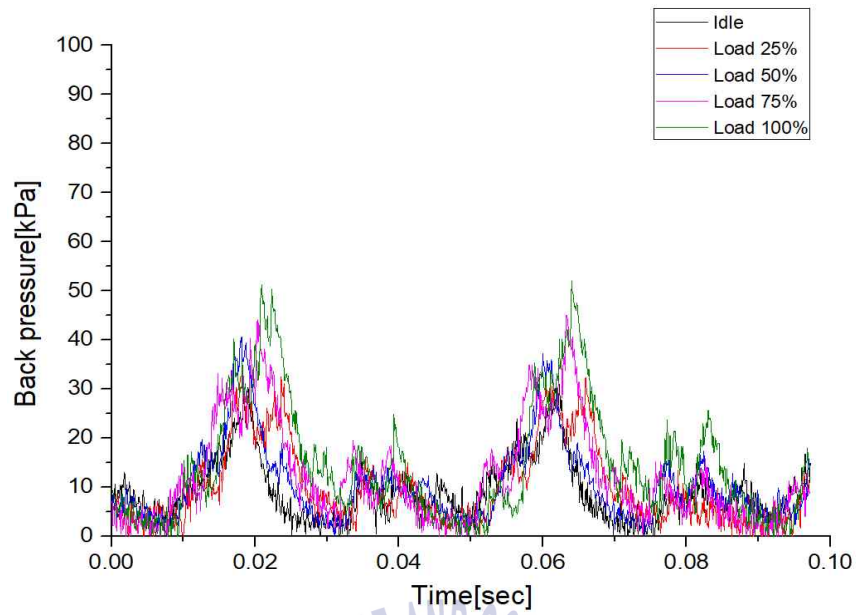
(c) at 1300RPM



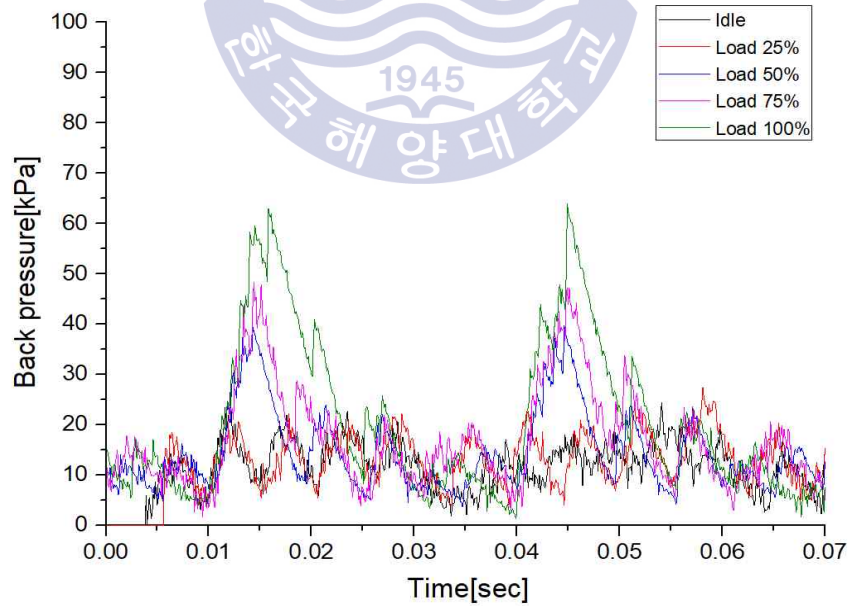
(d) at 1600RPM

Fig. 3.24 Back pressure at no packing 60°

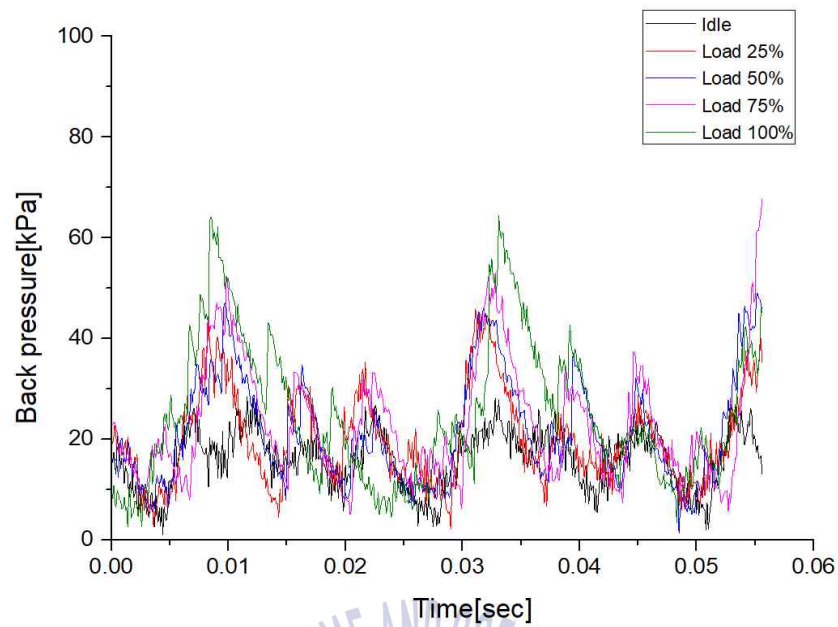




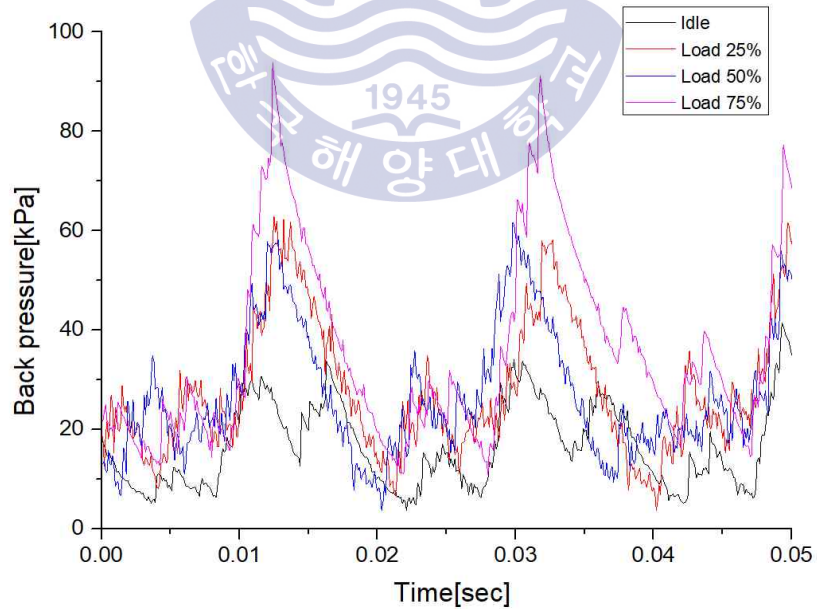
(a) at 700RPM



(b) at 1000RPM

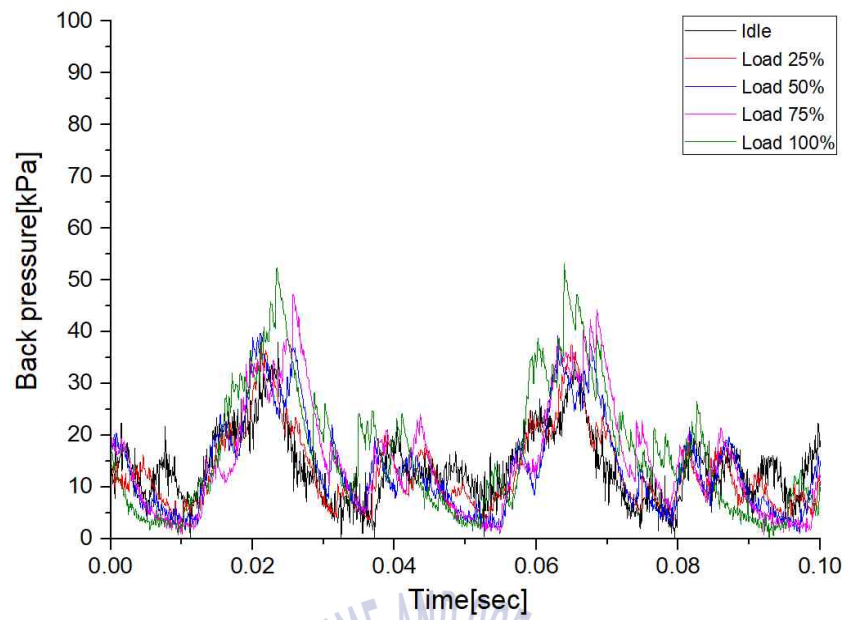


(c) at 1300RPM

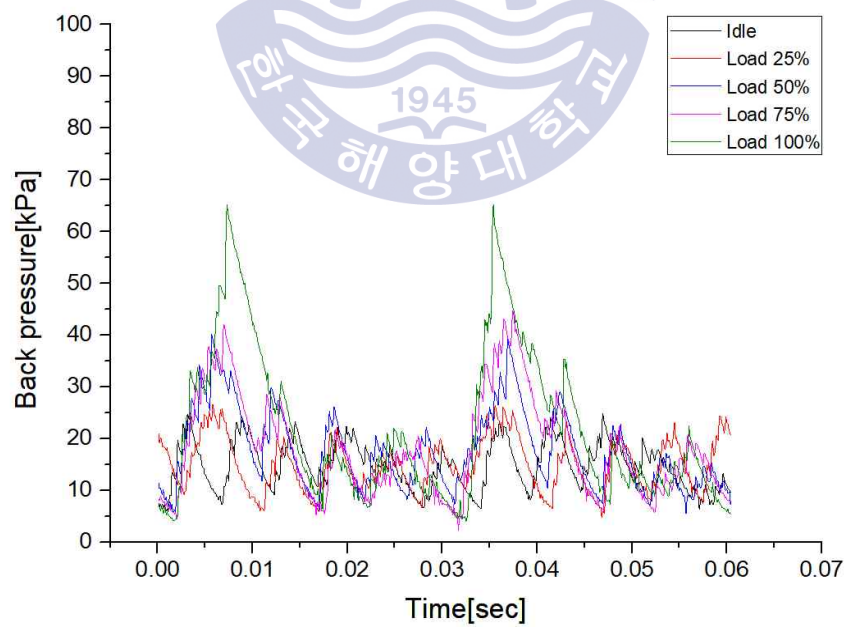


(d) at 1600RPM

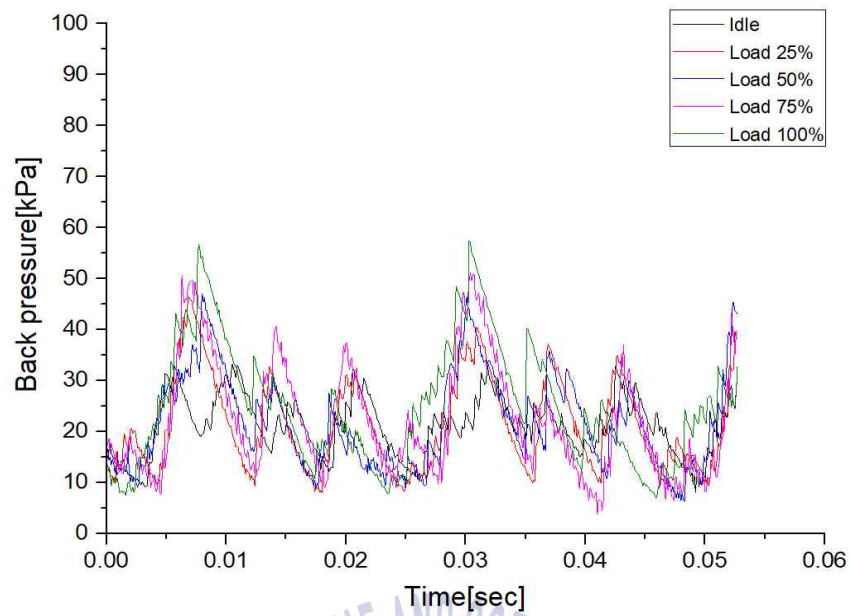
Fig. 3.25 Back pressure at no packing  $75^\circ$



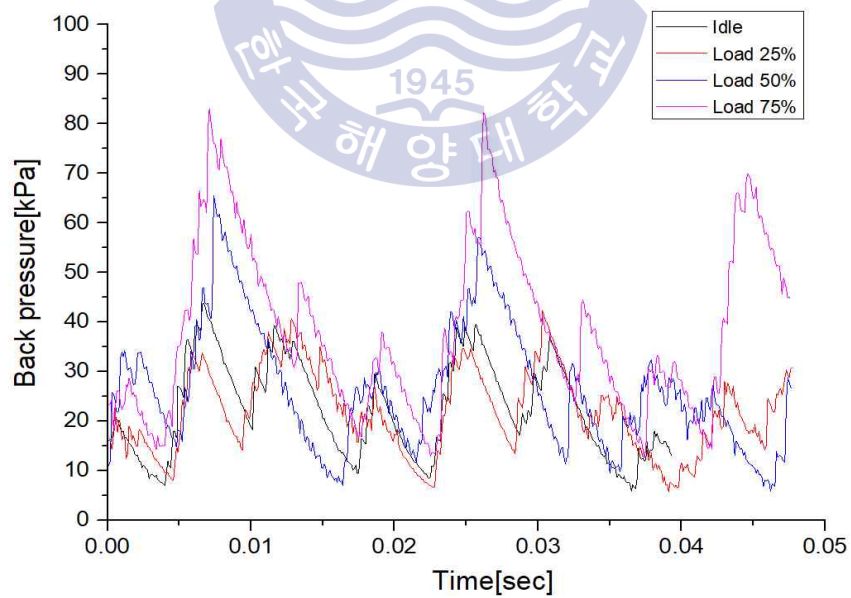
(a) at 700RPM



(b) at 1000RPM

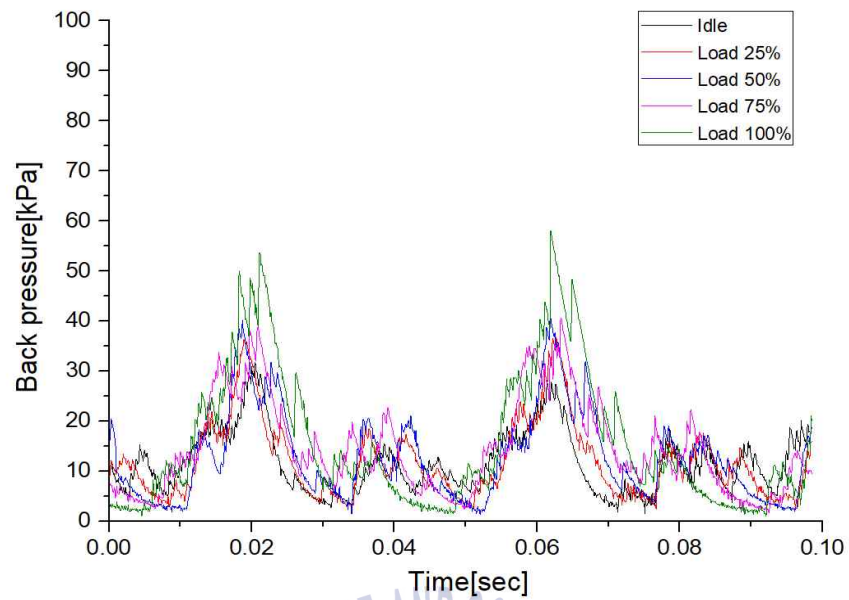


(c) at 1300RPM

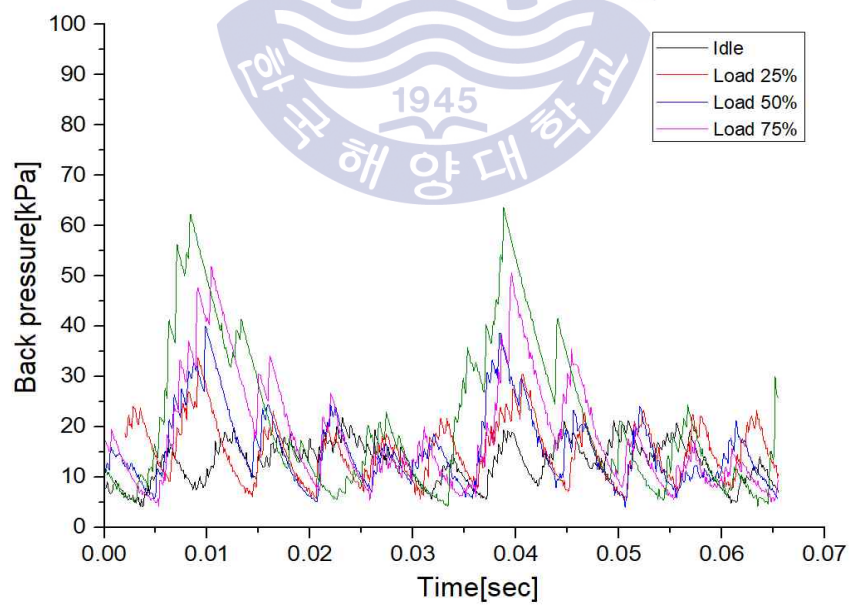


(d) at 1600RPM

Fig. 3.26 Back pressure at packing rate 100% 0°

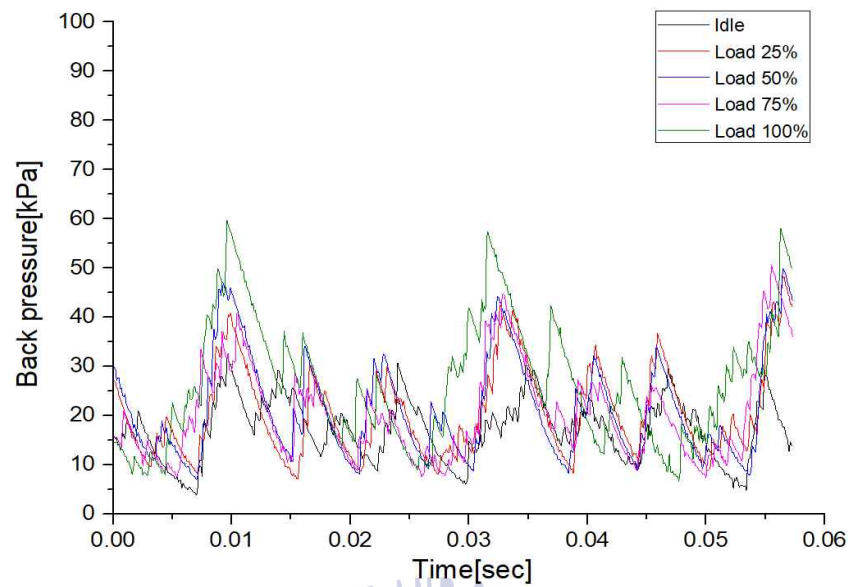


(a) at 700RPM

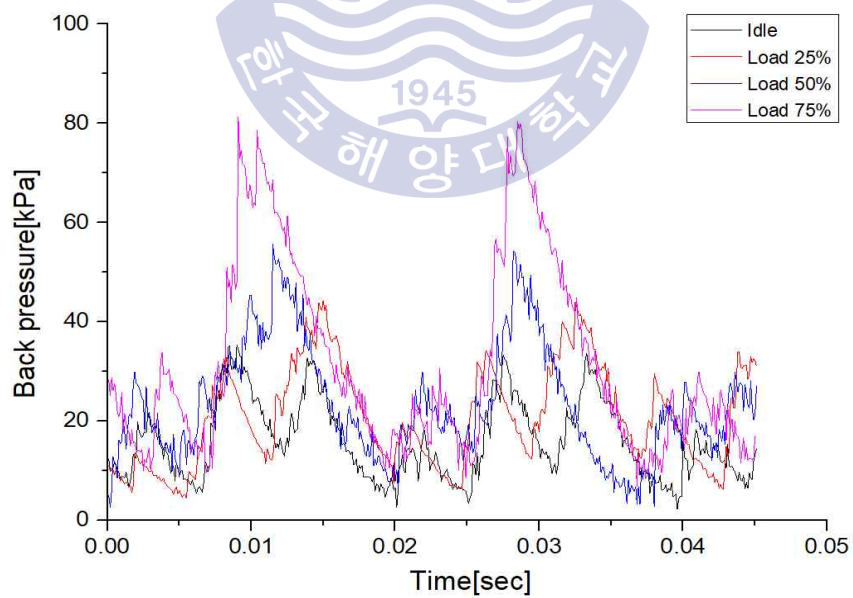


(b) at 1000RPM



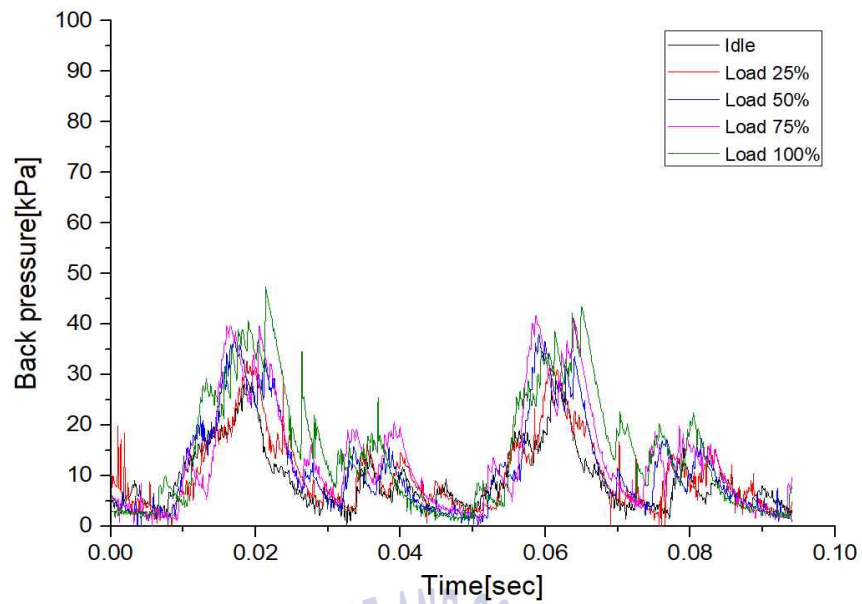


(c) at 1300RPM

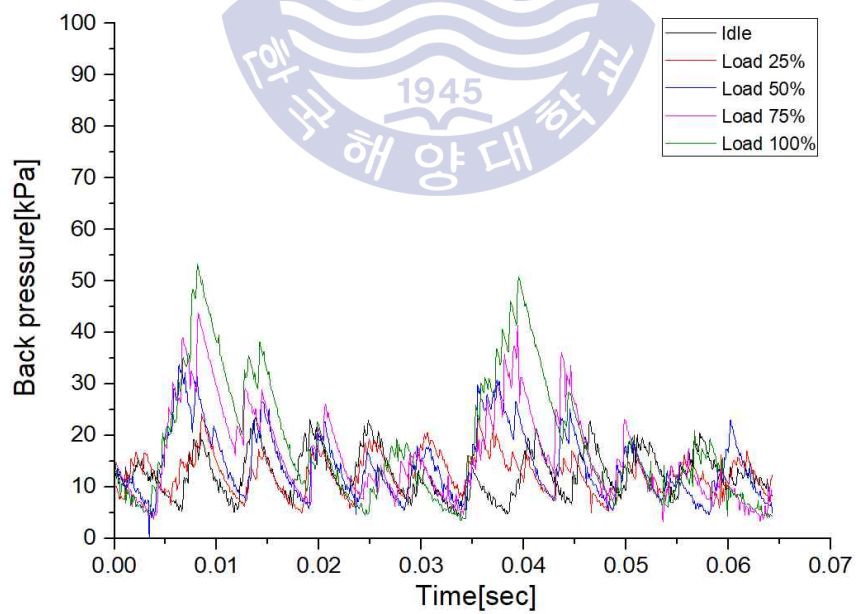


(d) at 1600RPM

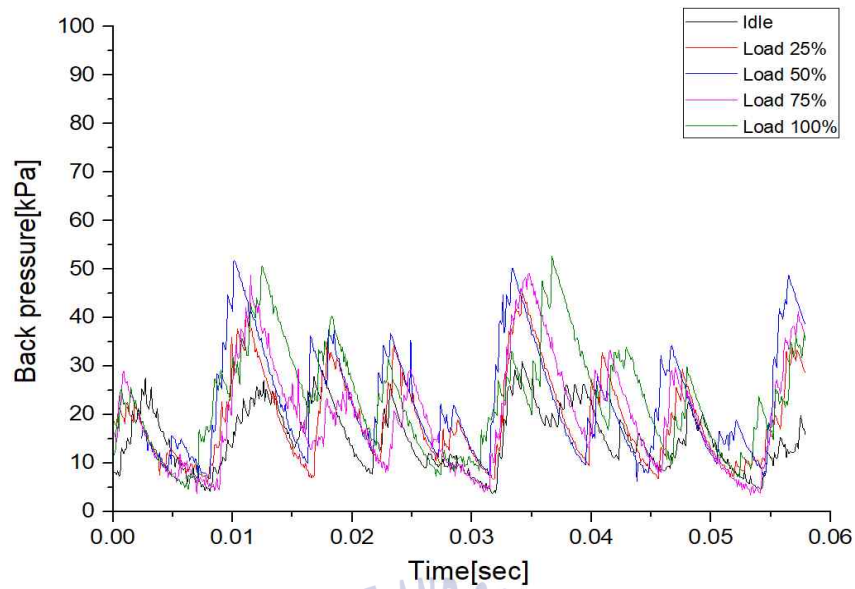
Fig. 3.27 Back pressure at packing rate 100% 45°



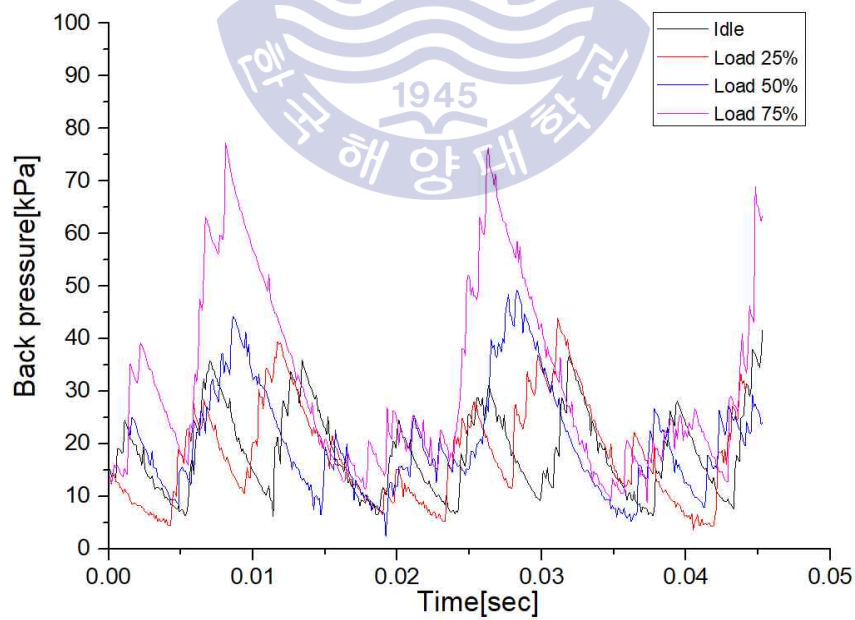
(a) at 700RPM



(b) at 1000RPM



(c) at 1300RPM



(d) at 1600RPM

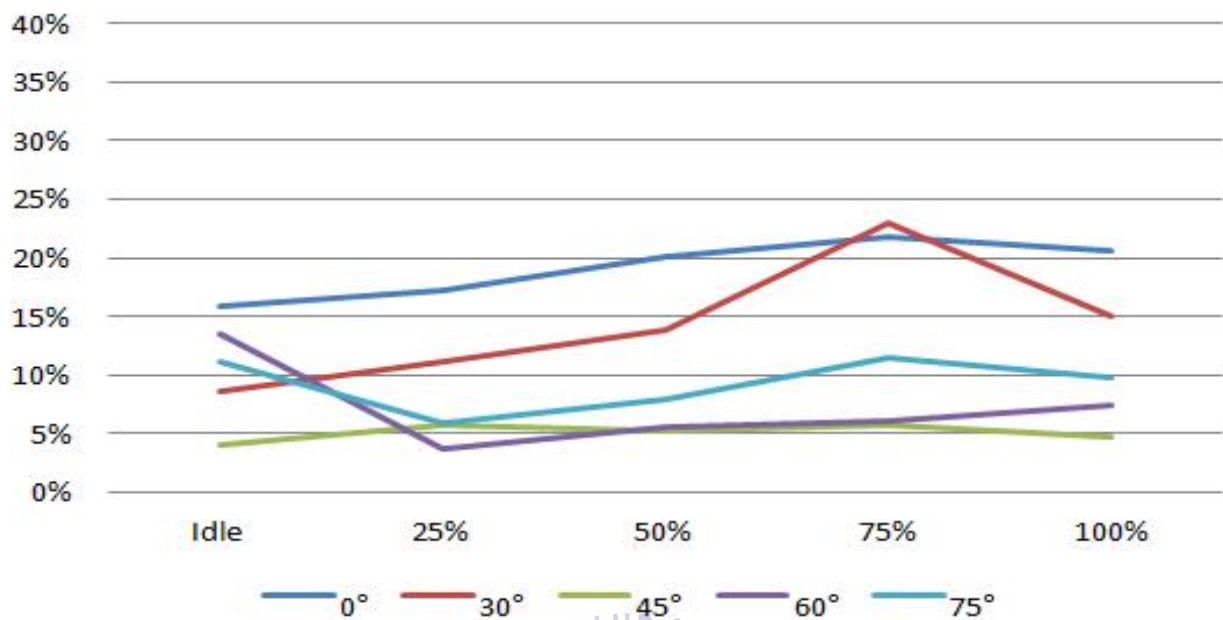
Fig. 3.28 Back pressure at packing rate 100% 75°

### 3.2.4 NO<sub>x</sub>

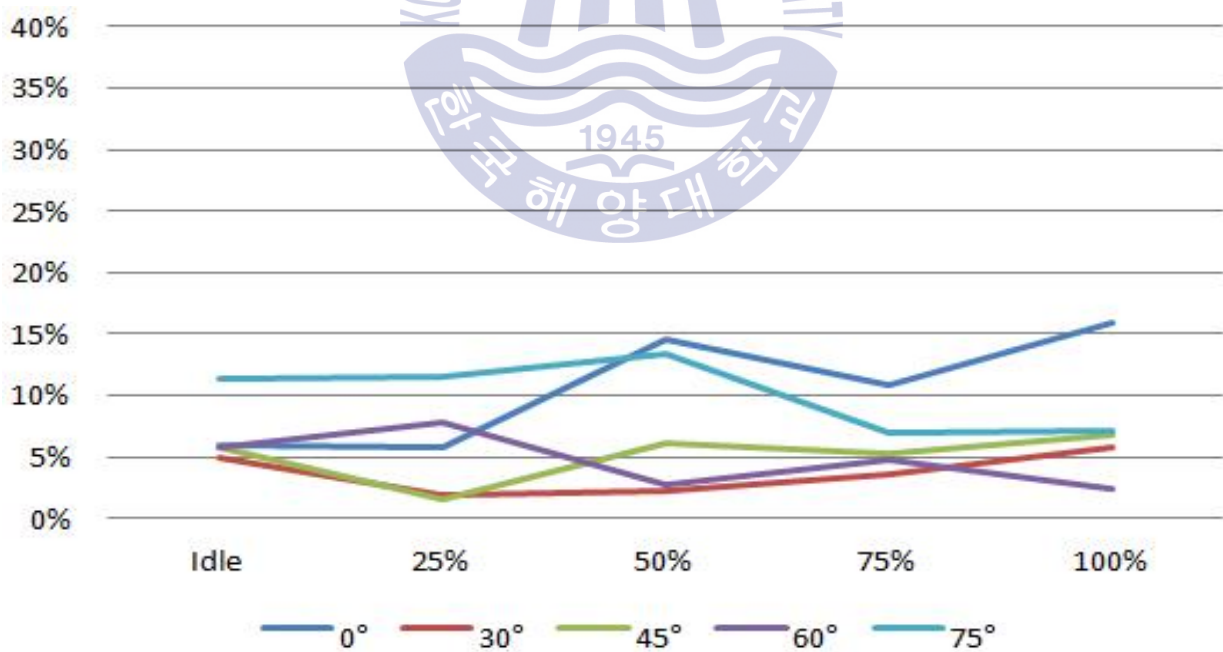
충진율 0%에서 각각의 엔진속도에서의 NO<sub>x</sub> 저감률을 비교해 보았을 때의 값을 Fig 3.29로 나타내었다. 낮은 RPM인 700RPM, 1000RPM에서는 각도가 적은 0°, 30°에서 다른 각도에 비해 큰 저감률을 보였지만, 높은 RPM인 1300~1600RPM으로 갈수록 45° 이상에서의 각도에서 좀 더 큰 저감률을 가졌다. 낮은 RPM에서는 5~20%의 저감률을 가지며 높은 RPM에서는 10%이하의 저감률이 나타났다.

이후 스크러버 효율에 큰 영향을 끼치는 충전물을 넣어 충진율 100%(6L)의 실험을 실시하였으며 전산 해석에서 가장 큰 효율을 보였던 45°를 기준으로 0°와 75°의 각도를 비교하기 위한 실험을 진행하였다.

충진율 100%에서의 NO<sub>x</sub> 저감률은 Fig 3.30으로 나타내었다. 충진율이 0%인 경우와 비교 분석 해석 해보았을 때 가이드 각도별 NO<sub>x</sub> 저감률이 일정하게 나타났으며 전산 해석의 값과 마찬가지로 45°에서 가장 좋은 효율을 나타내었지만 오히려 0°와 75°의 경우에는 0°에서 좀 더 좋은 효율을 갖는 모습을 나타내었다. 700RPM에서 가장 큰 저감률을 가졌던 가이드각도 45°에서는 평균20%의 저감률을 가졌으며 다른 조건에서는 평균 10% 전후의 저감률을 가진다. 이로써 NO<sub>x</sub> 저감률은 충전물이 있을 경우 45°에서 가장 효율적인 값을 가졌으며 75°의 가이드 각도를 가질 경우 0°의 가이드 각도보다 낮은 저감률이 측정되는 것을 확인하였다.

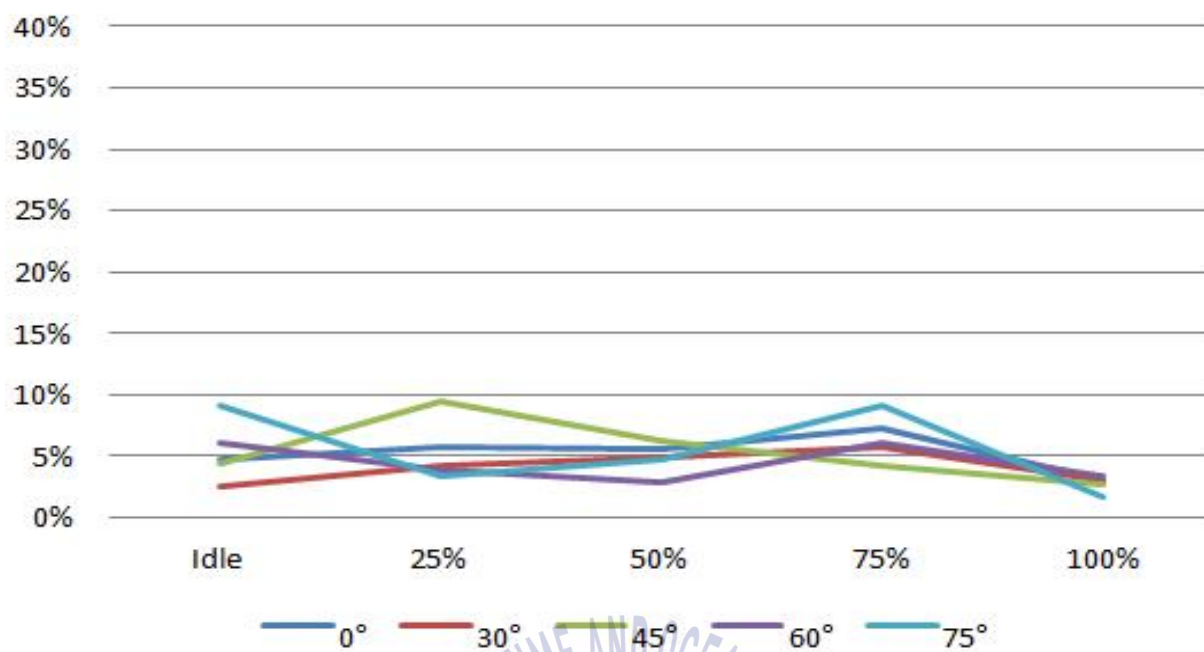


(a) 700RPM

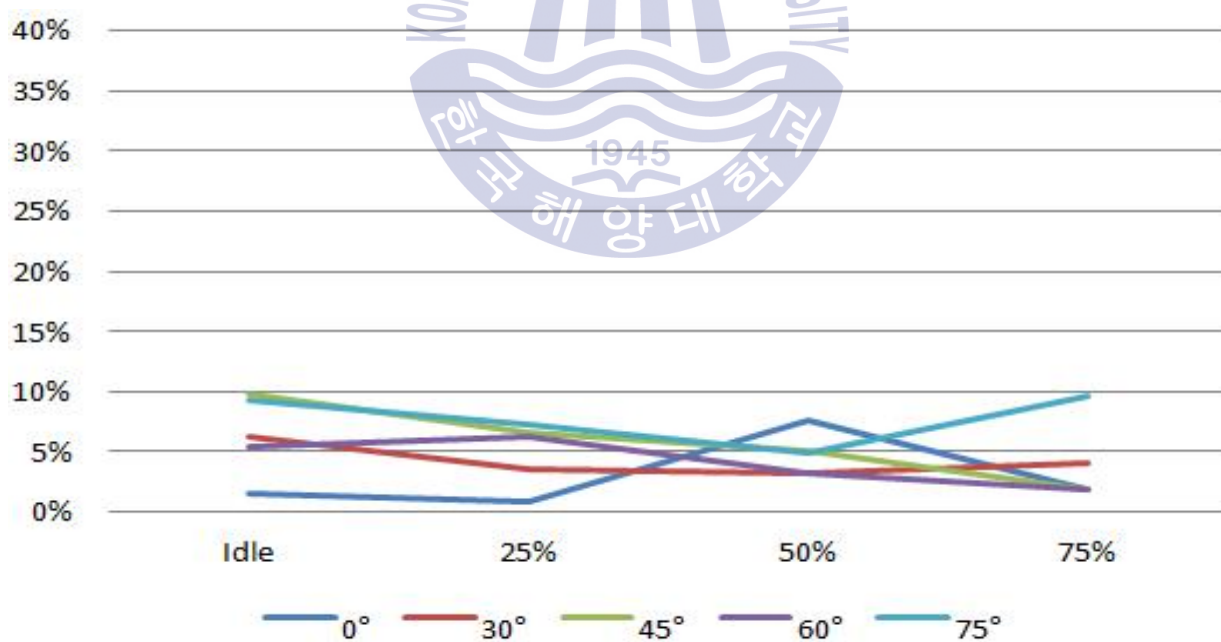


(B) 1000RPM



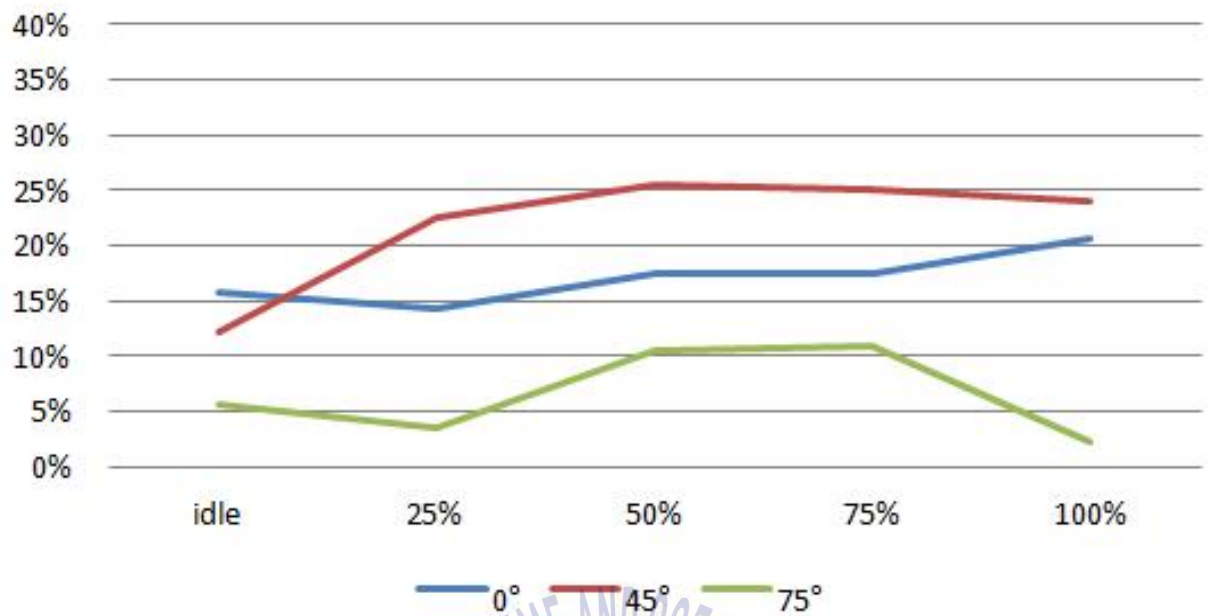


(C) 1300RPM

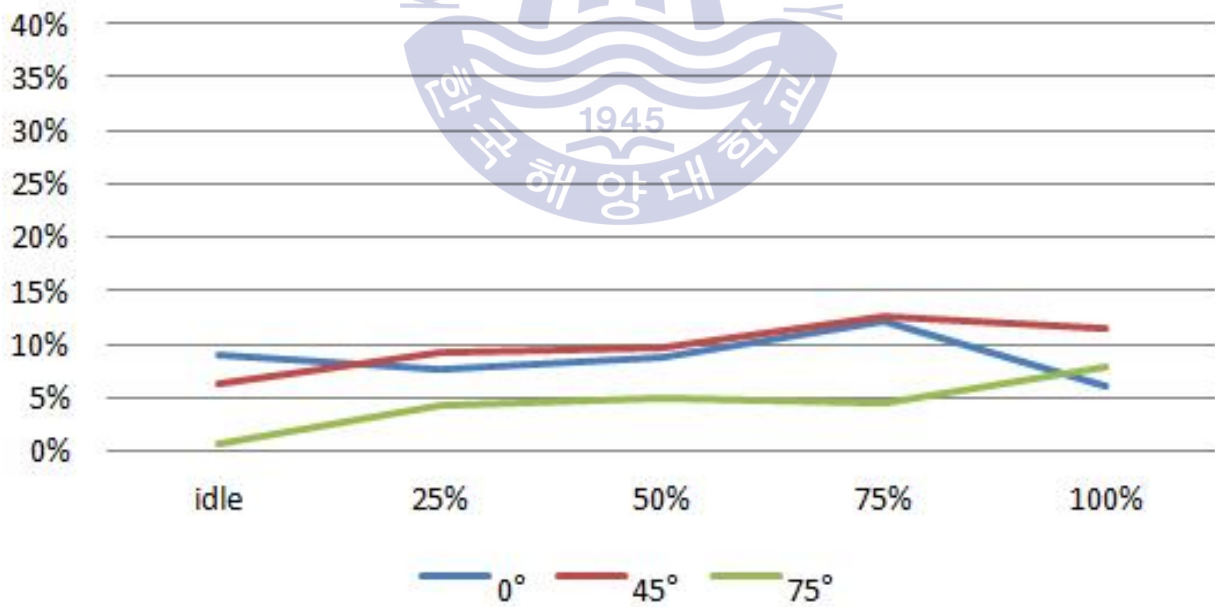


(D) 1600RPM

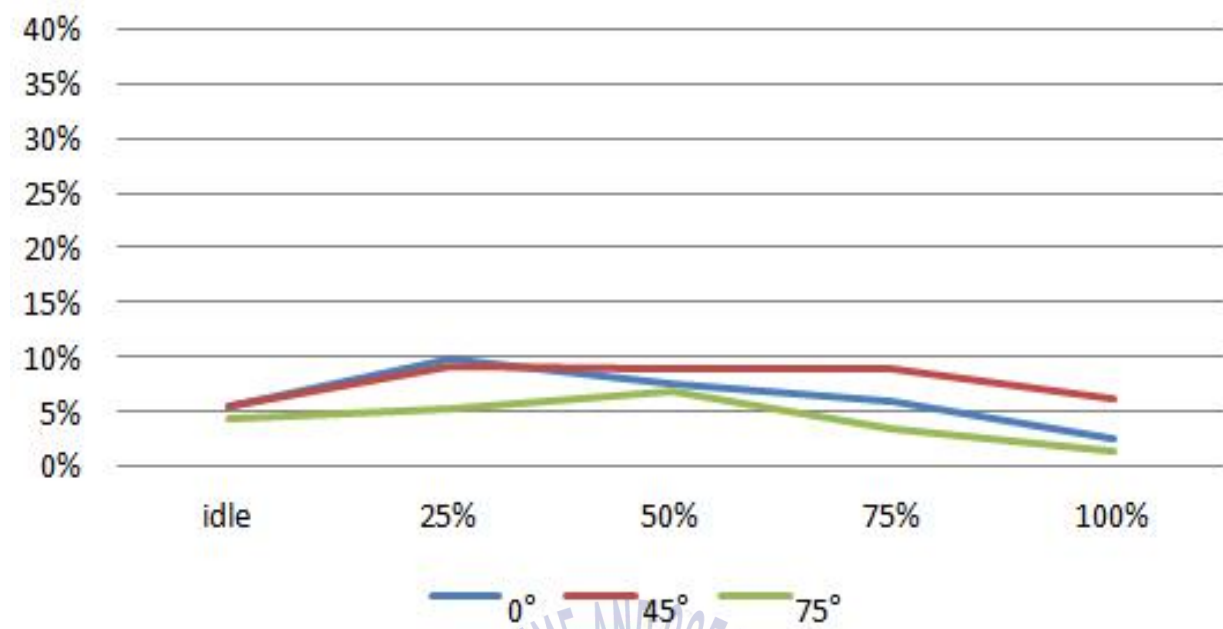
Fig. 3.29 NOx reduction at packing Rate 0%



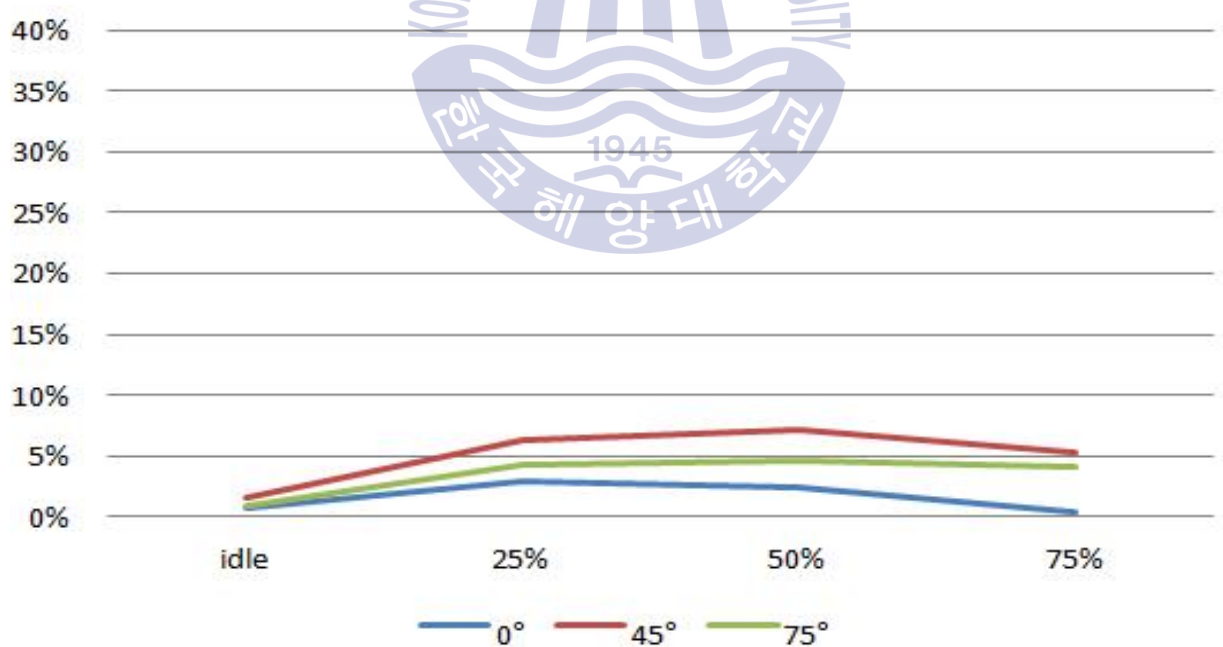
(a) 700RPM



(b) 1000RPM



(c) 1300RPM



(d) 1600RPM

Fig. 3.30 NOx reduction at packing Rate 100%

### 3.3 요약

엔진속도 700RPM, 1000RPM, 1300RPM, 1600RPM과 엔진부하 Idle, 25%, 50%, 75%, 100%에서의 충진율 0%와 100%에서의 배기가스 연료 소모시간, 배기가스 온도와 압력, 배기가스 측정, Smoke를 측정 및 분석 하였으며 이에 따른 실험적 고찰의 요약은 다음과 같다.

- 연료 소모시간은 배기 온도는 가이드베인의 각도나 충진율의 유무로 큰 영향을 끼치지 않았다.

- Back pressure의 경우 모든 실험 CASE에서 RPM이 증가함에 따라 증가하는 값을 나타내지만 1000RPM과 1300RPM에서는 큰 차이가 나타나지 않았으며 1600RPM에서 급격히 증가하는 값을 가진다.

- 배기가스의 경우 NOx에 대한 저감률을 확인 하였으며 충진율이 없을 때 저 속도 구간에서는 각도가 없거나 작은 구간 , 충진율이 100%일 때는 각도가 큰 구간에서 큰 저감률을 가지는 것을 확인하였다.

결과적으로 본 스크러버는 1600RPM 이상 구간에서는 Back pressure 증가와 NOx 저감이 적은 것으로 보아 사용이 부적합하다고 판단되며 새로운 스크러버 설계가 필요하다고 판단된다. 저 속도 구간의 NOx 저감률을 제외한 거의 모든 구간에서 각도를 가지는 구간에서 효율이 향상하는 것을 확인하였고 45° 구간이 조금 더 좋은 효율을 가지는 것으로 보아 45° 가 가장 적합하다고 판단된다.

## 제 4 장 CFD 해석과 실험결과 비교

### 4.1.1 Back pressure

Fig. 4.1은 가이드 베인 각도  $45^\circ$  일 때 CFD 해석과 실험의 Back pressure 증가율을 나타낸 그림이다.

CFD 해석 결과로서 각도가 증가함에 따라 압력의 증가율은 1.15배를 나타냈다. 실험에서는 엔진속도를 기준으로 1.06배에서 1.18배의 증가율을 나타냈으며, 평균 1.115배의 증가율을 나타냈다. 해석 결과는 실험값과 비교할 때 3%내에서 만족스런 결과를 나타낸다.

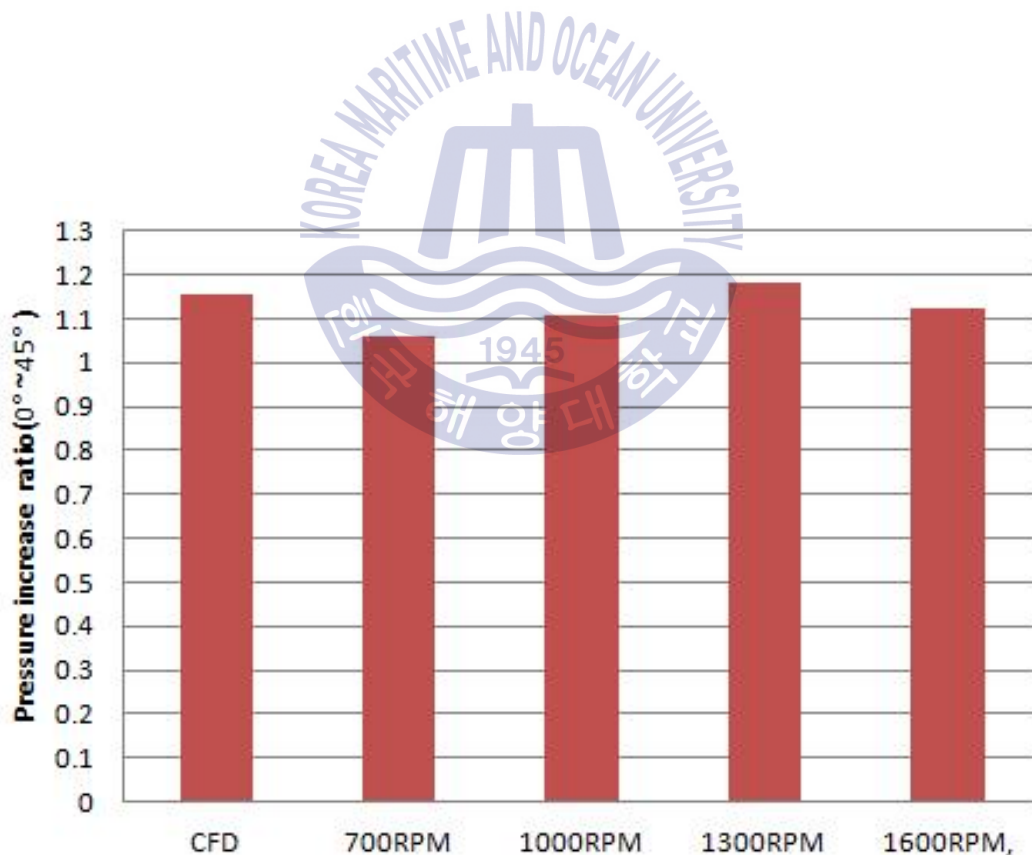


Fig. 4.1 Back pressure comparison

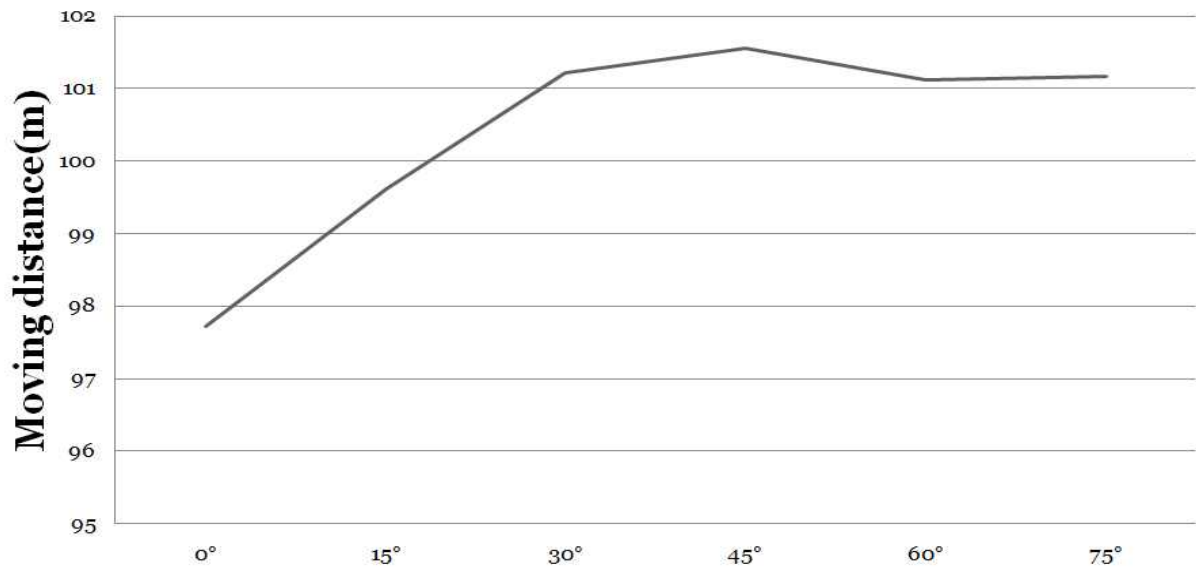


#### 4.1.2 배기가스 저감

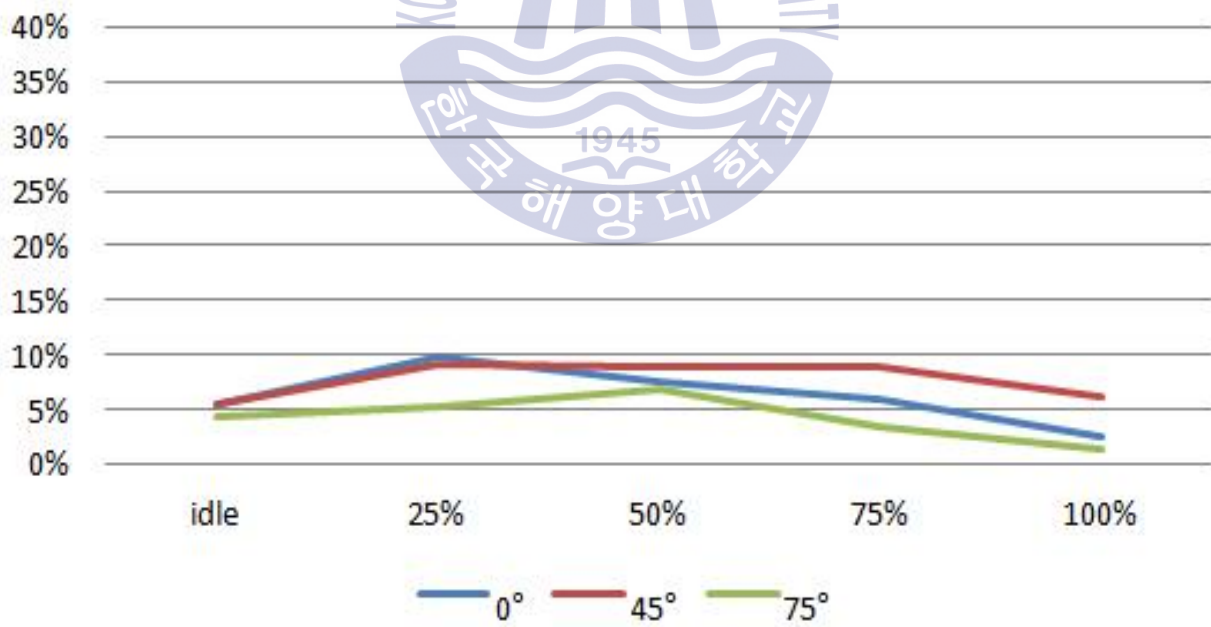
Fig. 4.2는 배기가스와 세정수의 접촉면적을 나타내는 배기가스 이동거리와 배기가스 저감률의 일부를 나타낸다. 배기가스 이동거리와 저감률은 밀접한 관계를 가진다.

배기가스 이동거리는  $45^{\circ}$  에서 가장 길었으며  $75^{\circ}$  그리고  $0^{\circ}$  의 순서를 가지며, 실험결과인  $\text{NO}_x$  저감률에서도  $45^{\circ}$  에서 가장 큰 저감률을 가졌으며,  $75^{\circ}$  그리고  $0^{\circ}$  의 순서를 가진다.





(a) Moving distance of internal area



(b) NOx reduction

Fig. 4.2 Exhaust gas reduction comparison

## 제 5 장 결 론

선박용 습식 스크러버는 선박내의 협소한 설치 조건 때문에 소형화가 필수적이다. 그로인해 동일 체적에서 내부유동이 최적화된 스크러버를 개발하여야한다.

와유동형 스크러버의 내부유동 최적화를 위한 본 연구는 계산과 실험을 통하여 수행되었다. CFD 계산을 통하여 가이드 베인 각도가  $0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  일 때 스크러버 내부 와유동 특성을 분석하였고, 이 결과에 대한 실증실험을 위하여 3300cc급 디젤엔진용 스크러버를 제작하고 엔진속도 700RPM, 1000RPM, 1300RPM, 1600RPM, 엔진부하 Idle, 25%, 50%, 75%, 100%, 충진율 0%, 100%의 조건으로 실험을 실시하였다. 와유동형 스크러버의 내부형상 최적화의 대한 전산 및, 실험적 고찰에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. CFD 계산 결과 배기압력과 질소산화물 예측이 실험과 3%내에서 일치하였다.
2. 가이드베인 각도에 따른 배기 압력은 베인 각도  $45^{\circ}$  까지 증가량이 크지 않지만  $45^{\circ}$  이상에서는 급격히 증가된다.
3. 엔진속도에 따른 배기압력은 1300RPM까지는 큰 차이가 없지만 1300RPM 이상에서는 크게 증가한다.
4. 배기가스와 세정수의 접촉면적을 나타내는 배기가스 이동거리는 베인 각도  $45^{\circ}$  까지 증가한 후에 각도가 더 커지면 오히려 감소한다.
5. 가이드날개 부근에서의 와유동 특성은 가이드날개의 전후단의 유동을 종합하였을 때  $30^{\circ}$  와  $45^{\circ}$  사이에서 가장 활성화되는 것으로 판단된다.

6. 질소산화물 저감은 베인 각도  $45^{\circ}$  일 때 가장 큰 저감률을 나타낸다.

7. 배기압력, 질소산화물 저감, 배기가스의 이동거리 및 가이드베인 부근의 와류동 분포 특성을 종합적으로 분석한 결과 가이드 베인 각도가  $45^{\circ}$  일 때 최적의 내부유동이 형성되는 것으로 판단된다.



## 참고문헌

- [1] J. N. Armor, "Catalytic reduction of nitrogen oxides with methane in the presence of excess oxygen : A review," Catalysis Today, vol. 26, pp. 147-158, 1995.
- [2] K. A. Bethke, M. C. Kung, B. Yang, M. Shah, D. Alt, C. Li, and H. H. Kung, "Metal oxide catalysts for lean NOX reduction," Catalysis Today, vol. 26, pp. 169-183, 1995.
- [3] 김성운 "선박 디젤엔진용 Urea-SCR 시스템의 성능개선을 위한 최적화 연구" 공학박사 학위논문 부산:한국해양대학교 2016.
- [4] 손권, 이주열, 박권하 "습식 스크러버의 분무유량 형상비 및 충진을 변화가 스모크 저감에 미치는 영향" 한국마린엔지니어링학회지 Vo., 39, No. 3 pp. 217~222, 2015.
- [5] 김인철, 김창구, 박성진, 조동연, 이영호, "CFD 해석 및 PIV 실험을 통한 연료유 스크러버의 노즐 위치선정" 한국마린엔지니어링학회지 Vol, 39, No 7 pp. 773~778, 2015.
- [6] 고승우, 노경철, 유홍선, "충진충식 스크러버의 스프레이 시스템 최적 설계에 대한 수치해석적 연구" 한국전산유체공학학회지 Vol 12, No 1 pp. 28~34, 2007.
- [7] 조호석, 구성모, 장혁상, "스크러버 내의 액적 분사형태에 따른 압력손실과 가스처리 효율에 관한 CFD 해석" 한국대기환경학회 학술대회논문집 pp 94~96, 2015.
- [8] 허진석, 채용배, 김정배, 김성운, 이상호, "중대형 박용기관의 스크러버 시스템에 관한 전산해석 연구" 대한설비공학회 학술발표대회논문집 pp 1061~1062, 2016.
- [9] 손권 "중소선박용 습식 스크러버의 최적설계에 관한 연구" 공학박사 학위논문 부산:한국해양대학교 2017.
- [10] 이찬현, 장혁상, 구성모 "스프레이형 스크러버의 배출가스에 포함된 액적의 제어 방법에 관한 전산해석적 연구" 한국청정기술학회 청정기술 Vol 21, No 3 PP. 191~199, 2015.
- [11] 이승일, 조기철, 신찬기, "배가스 중 NOx 및 SOx 제거용 자성유체 스크러버의 개발" 환경관리학회지 Vol. 5, No. 2 pp 429~436, 1999.
- [12] 박병현, 홍승혁, 임동호, 임윤희, 김요섭, 김병순, 이주열 "배가스 동시 처리를 위한 세정장치에 관한 연구" 한국산화기술학회 학술대회논문집, pp 836~837, 2014.
- [13] 김재강, 이주열, 박병현, 최진식 "습식 스크러버를 이용한 NOx 제거에 관한 연



- 구” J. of Korean Oil Chemists; Soc., Vol. 32, No. 2 pp. 296~301, 2015.
- [14] 한방우, 김학준, 송동근, 홍원석, 신완호, 김용진 “질소산화물 변환처리를 위한 펄스플라즈마- $\text{Na}_2\text{SO}_3$  스크러버 복합 시스템 연구” 한국대기환경학회 학술대회논문집 pp. 123, 2012.
- [15] 박진우, 박권하 “비산밀집형 스크러버 내부형상에 따른 세정수분포” 한국마린엔지니어링 학술발표대회논문집 pp 40, 2016.



## 감사의 글

대학원 생활을 처음 시작한 때가 엇그제 같은데 벌써 졸업을 하게 되었습니다. 6년이라는 기간이 짧은 기간은 아니지만 정말 금방 지나갔고 석사생활도 정말 금방 지나간 것 같습니다. 부족하지만 대학, 대학원생활 그리고 논문이 나오기까지 도움을 주셨던 많은 분들께 감사의 인사를 드리고자합니다.

우선 미흡한 저를 항상 아들처럼 챙겨주시고 지도와 격려를 아끼지 않으셨던 박권하 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 앞으로 성공하여 교수님의 제자라는 이름에 먹칠이 되지 않도록 노력하겠습니다. 또한 바쁘신 와중에도 저의 졸업 논문을 심사하고 세심한 지도와 충고의 말씀을 해주신 이영호 교수님, 정형호 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

제가 대학원 생활을 하는 동안 엔진실험실 멤버들이 아니었다면 대학원 생활이 더 힘들었을 것이라 생각을 합니다. 저에게 큰 힘이 되었던 권이형, 명록이형, 그리고 상민이 범석이에게도 감사함을 전합니다. 또한 11학번 동기들 원진이, 석현이, 용호형, 정태, 성환이, 변, 머루, 준기, 지연이, 미진이, 현지와 많은 친구들과 승현이, 현용이, 예린이, 자연후배들에게도 감사함을 전하고 멀리 있지만 항상 힘을 준 민우, 동우, 지성이, 안기, 병재, 성원이, 기수, 성수, 규성이, 연수, 호진이, 대성이, 재성이, 승환이, 준이, 지인이 누나, 채원이에게도 감사의 말씀을 드립니다. 또한 같이 프로젝트를 하며 많은 것을 가르쳐 주신 아티스 직원분들, 코메리 직원분들께도 감사의 말씀을 드립니다.

마지막으로 항상 많이 사랑해주시는 우리 할머니, 항상 쉬는 날 없이 일하시는 촌데레 박순현 반장님, 항상 아낌없이 주시는 문정애 여사님, 집에서 멀리나와 열심히 공부하는 이쁜 수연이, 추운날 군대가서 고생하는 잘생긴 동우 항상 고맙고 사랑합니다.

끝으로 저에게 도움과 격려 해주신 모든 분들께 진심을 담아 감사드리며 앞으로 하는 모든 일이 성공하길 빌며 이 논문을 마칩니다.